

ALEXIA SALEME AONA DE PAULA PEREIRA

**FERTILIZANTE ORGANOMINERAL DE MICROALGAS CULTIVADAS EM
ÁGUA RESIDUÁRIA: POTENCIAL AGRÍCOLA E CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Maria Lúcia Calijuri

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

P436f
2021
Pereira, Alexia Saleme Aona de Paula, 1994-
Fertilizante organomineral de biomassa cultivada em água
residuária : potencial agrícola e ciclo de vida / Alexia Saleme
Aona de Paula Pereira. – Viçosa, MG, 2021.
87 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Maria Lúcia Calijuri.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Microalgas. 2. Biomassa . 3. Lagoas de estabilização.
4. Biofertilizantes. 5. Ciclo de vida -Avaliação . I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 628.351

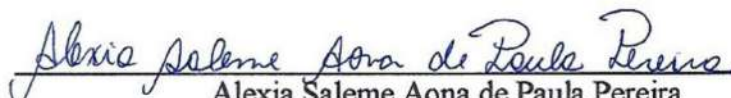
ALEXIA SALEME AONA DE PAULA PEREIRA

**FERTILIZANTE ORGANOMINERAL DE MICROALGAS CULTIVADAS EM
ÁGUA RESIDUÁRIA: POTENCIAL AGRÍCOLA E CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 04 de março de 2021

Assentimento:



Alexia Saleme Aona de Paula Pereira
Autora



Maria Lúcia Calijuri
Orientadora

A Deus.
Aos meus pais Alex e Eduarda;
Aos meus irmãos Eduardo e Alice;
Ao meu amor Otávio;
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Chega o fim de mais uma etapa na minha vida. Reconheço que não cheguei até aqui sozinha e tenho a imensa satisfação em agradecer a todos que torceram por mim e fizeram parte dessa conquista.

À professora Maria Lúcia Calijuri pela orientação durante todo o mestrado e confiança depositada em mim;

À Jackeline de Siqueira Castro e ao Vinícius José, pela disponibilidade, atenção e paciência em esclarecer minhas inúmeras dúvidas;

A todos os professores que contribuíram na minha formação, desde o ensino fundamental, ensino médio, graduação e pós-graduação, sem vocês eu não chegaria até aqui;

À Universidade Federal Viçosa (UFV), pelo ensino de qualidade, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realização deste curso e à Viçosa por ter me acolhido durante esses últimos sete anos;

Aos órgãos de fomento CAPES, pela concessão da bolsa de estudo, FAPEMIG e CNPq, pelos recursos destinados à realização dessa pesquisa;

Aos amigos que fiz durante essa trajetória por tornarem essa caminhada um pouco mais leve;

Aos meus pais Alex e Eduarda, pelo exemplo de vida e amor incondicional, por não medirem esforços para a realização desse sonho e por serem a minha inspiração.

À minha irmã Alice, pela amizade e cumplicidade, e ao meu irmão Eduardo por toda ajuda durante a realização do experimento.

Aos meus avós que se fizeram presentes ao longo dessa trajetória e estão eternizados no meu coração.

Ao Otávio, meu melhor amigo e amor, por todo carinho e companheirismo.

E por fim, porém não menos importante, agradeço àquele que permitiu que tudo fosse possível. Obrigada DEUS!

“O amor é o segredo de tudo”.

Emicida

BIOGRAFIA

Alexia Saleme Aona de Paula Pereira, filha de Alex Sandro de Paulo Pereira e Eduarda Mytsue Saleme Aona Pereira, nasceu em Ipatinga-MG, em 31 de maio de 1994. cursou ensino médio e técnico em Química na Escola Padre de Man, Coronel Fabriciano-MG, concluindo-o em 2011. Ingressou em 2013 na Universidade Federal de Viçosa – UFV para se formar em Engenharia Ambiental em janeiro de 2019. Em março de 2019 iniciou o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Engenharia Sanitária e Ambiental, na Universidade Federal de Viçosa. Em 04 de março de 2021 defende sua tese intitulada “Fertilizante organomineral pastilhado a partir de microalgas cultivadas em águas residuárias: potencial agrícola e abordagem de ciclo de vida” orientado pela Professora D. Sc. Maria Lúcia Calijuri.

RESUMO

PEREIRA, Alexia Saleme Aona de Paula, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Fertilizante organomineral de microalgas cultivadas em água residuária: potencial agrícola e ciclo de vida.** Orientadora: Maria Lúcia Calijuri.

A presente pesquisa investigou o potencial do uso de biomassa de microalgas (BM) cultivadas em lagoas de alta taxa (LATs), tendo água residuária como meio de cultivo, para a produção de um fertilizante organomineral pastilhado (FOP) em substituição a um fertilizante químico. O fertilizante proposto é composto pela combinação de biomassa de microalgas (BM), cultivada em efluente da indústria de alimentos, e ureia em diferentes proporções. O trabalho foi constituído de dois estudos. No primeiro, dois experimentos foram conduzidos simultaneamente em casa de vegetação (30 dias), em que o principal objetivo foi avaliar o desempenho do fertilizante proposto quanto às perdas por volatilização de amônia ($N-NH_3$) ao longo do tempo e quanto à capacidade de assimilação de nitrogênio (N) pelas plantas de milho (*Zea mays* L.), por meio da aplicação de uma dose de 100 mg dm^{-3} de N. Ainda foi possível analisar a estrutura do FOP desenvolvido por meio da microscopia eletrônica de varredura. Os tratamentos possuíam a seguinte composição: ureia + 5 % de biomassa de microalga (MBU5); ureia + 15 % de biomassa de microalga (MBU15); ureia + 30 % de biomassa de microalga (MBU30); ureia + 40 % de biomassa de microalga (MBU40); ureia + 50 % de biomassa de microalga (MBU50); e ureia (UR). Os principais resultados indicaram que a maior volatilização acumulada de $N-NH_3$ foi no tratamento MBU40 e o conteúdo máximo de N foi alcançado na proporção de 24,55% de BM. Os fatores que contribuíram na obtenção destes resultados foram a interação entre a BM e a ureia na pastilha de fertilizante organomineral produzida, onde uma barreira física cada vez mais espessa foi formada com o aumento da proporção de BM; além do pH do FOP, no qual o aumento das proporções de BM favoreceu diretamente o aumento do pH. O segundo estudo teve como objetivo verificar o desempenho do fertilizante proposto quanto aos impactos ambientais associados à produção e aplicação do FOP para a produção de matéria seca da planta de milho. Desse modo, realizou-se uma avaliação de ciclo de vida (ACV) onde foram consideradas as etapas de cultivo, colheita e secagem da BM além da produção de pastilhas e aplicação no solo como fertilizante de N. A análise foi realizada por meio do software SimaPro®, utilizando dados primários obtidos durante o processo descrito no primeiro estudo e dados secundários obtidos em literatura. A simulação de Monte Carlo também foi empregada

para verificar a incerteza nas várias entradas de dados, assumindo uma distribuição uniforme e intervalo de confiança de 95%. Adotou-se 1 kg de planta de milho cultivada durante 30 dias como unidade funcional, para assim permitir comparações entre o desempenho do FOP e o fertilizante químico. Os principais resultados indicaram que os tratamentos que com menor geração de impacto foram os cenários C1 (5 % de BM), C2 (15% de BM) e C3 (30 % de BM) e as categorias mais influenciadas pelo uso de fertilizante químico foram acidificação terrestre (35,49 %), formação de material particulado (47,01 %) e depleção fóssil (99,61 %). Porém, o aumento da proporção de BM influenciou na geração de impactos ambientais, devido aos processos e insumos utilizados durante a etapa de cultivo e colheita de biomassa. A análise de Monte Carlo indicou maiores incertezas para as categorias de consumo de água (12,67 %) e eutrofização de água (12,36 %). Por fim, avaliou-se um cenário otimizado no qual se considerou o processo de sedimentação gravitacional sem a adição de coagulante químico. A estratégia adotada favoreceu a mitigação dos impactos ambientais para todas as categorias analisadas, principalmente para as categorias acidificação terrestre (93,64 %), eutrofização marinha (93,53 %), formação de material particulado (87,57 %) e depleção fóssil (75,60 %) dando maior competitividade ao fertilizante proposto.

Palavra-chave: Biomassa de Microalgas. Lagoas de Alta Taxa. Biofertilizantes. Avaliação de Ciclo de Vida.

ABSTRACT

PEREIRA, Alexia Saleme Aona de Paula, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, March 2021. **Organomineral fertilizer from biomass grown in wastewater: Agricultural Potencial and Life Cycle.** Adviser: Maria Lúcia Calijuri.

The present work investigated the potential of using microalgae biomass (MB) cultivated in high-rate ponds (HRP), through wastewater, in the production of a pelleted organomineral fertilizer (POF) to replace the chemical fertilizer. The fertilizer proposed by this paper is composed of a combination of microalgae biomass, grown in the effluent from the food industry, and urea in different proportions. The work is composed of two studies. The first one consists of two experiments conducted simultaneously in a greenhouse (30 days), in which the main objective was to evaluate the performance of the proposed fertilizer in terms of losses due to ammonia volatilization (N-NH_3) over time, regarding the nitrogen assimilation capacity (N) by corn plants (*Zea mays* L.), by applying a dose of 100 mg dm^{-3} of N. In this study, it was still possible to evaluate the structure of the POF developed, through scanning electron microscopy. The evaluated treatments had the following composition: Urea + 5% of Microalgae Biomass (MBU5); Urea + 15% Microalgae Biomass (MBU15); Urea + 30% Microalgae Biomass (MBU30); Urea + 40% Microalgae Biomass (MBU40); Urea + 50% Microalgae Biomass (MBU50); and Urea (UR). The main results indicated that the highest accumulated volatilization of N-NH_3 was in the proportion of 40% of MB and the maximum content of N is reached in the proportion of 24.55% of MB. The factors that contributed to obtaining these results were the interaction between MB and urea in the produced organomineral fertilizer tablet, where an increasingly thicker physical barrier was formed, with the increase in the proportion of MB; in addition to the POF pH, in which the increase in MB proportions directly favored the pH increase. The second study aimed to evaluate the performance of the proposed fertilizer in terms of possible environmental impacts associated with the production and application of the POF for the dry matter production of the corn plant. In this way, a life cycle analysis (LCA) was carried out, in which the stages of cultivation, harvesting, and drying of MB were considered, in addition to pellet production and application to the soil as N fertilizer. The analysis was performed utilizing the software SimaPro®, using primary data obtained during the process described in the first study, and secondary data obtained in the literature. Also, Monte Carlo simulation was used to assess the uncertainty in the various data inputs, assuming a uniform distribution and a

95% confidence interval. 1 kg of corn plant cultivated for 30 days as a functional unit was adopted to allow comparisons between POF performance and chemical fertilizer. The main results indicated that the treatments with the lowest impact generation were scenarios C1 (5% BM), C2 (15% BM), and C3 (30% BM), and the categories most influenced by the use of chemical fertilizer were terrestrial acidification (35.49%), formation of particulate matter (47.01%) and fossil depletion (99.61%). However, the increase in the proportion of BM influenced the generation of environmental impacts due to the processes and inputs used during the stage of cultivation and harvesting of biomass. The Monte Carlo analysis indicated greater uncertainties for the categories of water consumption (12.67%) and water eutrophication (12.36%). Finally, an alternative scenario was evaluated in which the gravitational sedimentation process was considered without the addition of a chemical coagulant. The adopted strategy favored the mitigation of environmental impacts for all categories analyzed, mainly for the categories of terrestrial acidification (93.64%), marine eutrophication (93.53%), formation of particulate material (87.57%), and fossil depletion (75.60%) making the proposed fertilizer more competitive.

Keywords: Microalgae Biomass. High Rate Ponds. Biofertilizers. Life cycle assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1. Câmara de quantificação de volatilização de amônia.....	29
Figura 5.2. Experimento de avaliação da eficiência das fontes na cultura de milho.	30
Figura 5.3. Perdas diárias (a) e acumulativas (b) de volatilização de N-NH ₃ após a aplicação das diferentes fontes de N ao longo do tempo.....	33
Figura 5.4. Volatilização acumulada (kg ha ⁻¹) em função das diferentes taxas de BM aplicada. ** significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.	34
Figura 5.5. Conteúdo de N (mg vaso ⁻¹) da parte aérea da planta de milho (<i>Zea mays</i> L.) em função das concentrações de Biomassa de Microalga (%) presente no FOP.....	36
Figura 5.6. Conteúdo de macro e micronutrientes presente nas plantas ao final do experimento.....	38
Figura 5.7. Imagem das pastilhas de fertilizantes produzidas por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). (a) UR; (b) MBU5; (c) MBU15; (d) MBU30; (e) MBU40; (f) MBU50.	40
Figura 6.1. Fluxogramas de produção de fertilizante pastilhado (A) e ureia granulada (B).	61
Figura 6.2. Contribuição relativa dos impactos ambientais dos cenários avaliados.	66
Figura 6.3. Potenciais impactos ambientais (total e por input).....	67
Figura 6.4. Impactos gerados em diferentes etapas do processo para a produção de 1kg de planta.....	68
Figura 6.5. Comparação percentual dos impactos entre o melhor cenário técnico (C2), cenário de uso de fertilizante químico (C6) e cenário otimizado (C7).	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Características físico-químicas do solo utilizado.....	27
Tabela 5.2. Descrição dos tratamentos observados no presente estudo.	28
Tabela 5.3. Coeficientes da equação logística e tempo necessário para atingir a metade da produção máxima de N-NH ₃ volatilizado durante um período de trinta dias.	35
Tabela 5.4. Resultados de estudos a respeito da volatilização de N-NH ₃ no solo.	41
Tabela 6.1. Dados primários e secundários utilizados na ACV.....	60
Tabela 6.2. Inventário do ciclo de vida dos biofertilizantes e granulação da ureia.	64
Tabela 6.3. Consumo de energia por etapa da produção, em porcentagem.....	65
Tabela 6.4. Resultados da simulação de Monte Carlo para as categorias de impacto afetadas.	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APHA – American Public Health Association

ACV – Avaliação de ciclo de vida

Ca – Cálcio

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Fe –Ferro

FOP – Fertilizante organomineral pastilhado

GEE – Gases de efeito estufa

HRP – High-rate ponds

K – Potássio

kg 1,4-DB eq – Quilograma de 1,4 diclorobenzeno equivalente

kg CFC-11 eq – Quilograma de clorofluorocarboneto equivalente

kg CO₂ eq – Quilograma de dióxido de carbono equivalente

kg N eq – Quilograma de nitrogênio equivalente

kg óleo eq – Quilograma de óleo equivalente

kg P eq – Quilograma de fósforo equivalente

kg PM10 eq – Quilograma de material particulado inferior a 10 micrômetros equivalente

kg SO₂ eq – Quilograma de dióxido de enxofre equivalente

LAT – Lagoa de alta taxa

LCA – Life cycle assessment

ISO – International Organization for Standardization

BM – Biomassa de microalgas

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

Mg – Magnésio

MSPA – Massa de matéria seca da parte aérea

Mn – Manganês

MOS – Matéria orgânica do solo

N – Nitrogênio

Na – Sódio

NTK – Nitrogênio total Kjehdal

N- NH₄⁺ – Nitrogênio amoniacal

N - NO₃⁻ – Nitrogênio nitrato

OD – Oxigênio Dissolvido

P – Fósforo

SSV – Sólidos suspensos voláteis

UFV – Universidade Federal de Viçosa

UR – Ureia

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	17
2. INTRODUÇÃO GERAL.....	18
3. HIPÓTESES.....	20
4. OBJETIVOS	21
4.1. Objetivo Geral.....	21
4.2. Objetivos Específicos	21
5. ARTIGO 1: FERTILIZANTE ORGANOMINERAL PASTILHADO A PARTIR DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS: VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E CRESCIMENTO DE PLANTAS	22
5.1. Introdução.....	23
5.2. Material e Métodos.....	24
5.2.1. Produção e caracterização da biomassa de microalgas	24
5.2.2. Produção do fertilizante organomineral	26
5.2.3. Caracterização do solo.....	26
5.2.4. Design experimental.....	28
5.2.4.1. <i>Quantificação da volatilização de N-NH₃ das fontes nitrogenadas</i>	28
5.2.4.2. <i>Avaliação da eficiência das fontes na cultura do milho <i>Zea mays</i> L.</i>	30
5.2.5. Análise estatística.....	31
5.3. Resultados.....	32
5.3.1. Volatilização de N-NH ₃	32
5.3.2. Eficiência das fontes de N na cultura de milho <i>Zea mays</i> L.....	36
5.3.2.1. <i>Taxa de recuperação de N pelas plantas</i>	36
5.3.2.2. <i>Produção de massa de matéria seca de plantas e acúmulo de macro e micronutrientes</i>	37
5.3.3. Caracterização do Fertilizante Organomineral Pastilhado	39
5.4. Discussão	41
5.4.1. Perspectivas futuras.....	46

5.5. Conclusão	47
Referências.....	48
6. ARTIGO 2: PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A BASE DE MICROALGAS: UMA ABORDAGEM DO CICLO DE VIDA.....	54
6.1. Introdução.....	55
6.2. Materiais e Métodos	56
6.2.1. Avaliação do ciclo de vida.....	57
6.2.1.1. Definição de objetivo, unidade funcional e escopo do estudo.....	57
6.2.1.2. Inventário de ciclo de vida	59
6.2.1.3. Categorias de impacto e metodologia LCA.....	61
6.2.2. Análise de incerteza	62
6.2.3. Proposição de cenário otimizado	62
6.3. Resultados.....	63
6.3.1. Inventário de ciclo de vida.....	63
6.3.2. Comparação entre os cenários: impactos ambientais.....	65
6.3.3. Incerteza nas emissões relacionadas as categorias de impacto.....	70
6.3.4. Cenário otimizado	72
6.4. Discussão	73
6.5. Conclusão	75
Referências	76
7. CONCLUSÃO GERAL	81
8. CONSIDERAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXO	86

1. APRESENTAÇÃO

A pesquisa é parte dos estudos desenvolvidos pelo Núcleo de Pesquisas Ambientais Avançadas (nPA) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV) que envolvem as tecnologias de tratamento de efluentes, produção de biomassa de microalgas de forma suspensa em lagoas de alta taxa (LATs) para obtenção de bioenergia e demais produtos de valor agregado. No presente estudo, foi dada ênfase na rota de valorização agrícola da biomassa de microalgas geradas a partir do tratamento de águas residuárias agroindustriais com o objetivo de desenvolver uma tecnologia inovadora para aumentar a produtividade, reduzir as perdas de nutrientes e mitigar a geração de impactos ambientais.

Foram investigadas diferentes proporções entre microalgas e fertilizante químico (ureia) para a obtenção de um fertilizante organomineral pastilhado (FOP), os efeitos quanto às perdas por volatilização de $N-NH_3$ após sua aplicação no solo, a capacidade de assimilação de N por plantas de milho (*Zea mays* L.), comparando os resultados com o fertilizante comercial, além de identificar os impactos ambientais da aplicação por meio da avaliação de ciclo de vida (ACV). Esse documento estruturado em uma introdução geral, hipóteses, objetivos, dois artigos, conclusões gerais e considerações para pesquisas futuras.

O primeiro artigo teve como objetivo desenvolver um fertilizante composto pela combinação de microalgas e ureia e estudar seus efeitos da sua aplicação no solo e planta, onde foram realizados experimentos em vasos dispostos em ambiente aberto, além de apresentar as perspectivas futuras do ponto de vista de reprodutibilidade do processo em um possível cenário de aumento de escala. O mesmo já se encontra publicado no periódico *Science os The Total Environment* (ISSN: 0048-9697).

O segundo artigo teve foco principal avaliação dos impactos ambientais da produção do fertilizante composto por biomassa de microalgas e ureia, onde são consideradas todas as entradas e saídas do processo, desde a produção da biomassa de microalga até a sua aplicação como fertilizante de nitrogênio. A metodologia utilizada foi avaliação do ciclo de vida (ACV), onde foram considerados dados primários descritos no primeiro artigo e dados secundários da literatura, além da realização da simulação de Monte Carlo, para identificar as incertezas das entradas de dados.

2. INTRODUÇÃO GERAL

Diante da atual demanda por recursos, crescimento populacional e do aumento do processo de industrialização e urbanização, se faz necessário a mudança de paradigma de geração de impactos ambientais causados pelas atividades humanas (Mendonça et al., 2021). O lançamento de águas residuárias em corpos d'água sem o devido tratamento gera impactos ambientais como a eutrofização. O tratamento de águas residuárias é, portanto, uma alternativa para promover a recuperação e valorização de recursos, como os nutrientes, além de promover a sustentabilidade das ações humanas (Arashiro et al., 2018; Choudhary et al., 2016; Mendonça et al., 2021). A recuperação de nutrientes de águas residuárias é uma solução, principalmente pela produção de microalgas, via tratamento em lagoas de alta taxa (LATs) (Castro et al., 2020b; Collotta et al., 2018; Herrera et al., 2020; Liu et al., 2021; Soares et al., 2019).

A biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias podem ser utilizadas como matéria prima para produção de fertilizantes, pois além de apresentarem teores de nitrogênio (N) e fósforo (P), essenciais para o crescimento das plantas, elas contêm micronutrientes como zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe) e cálcio (Ca) que também atuam nas funções metabólicas das plantas. Segundo Wuang et al. (2016), a biomassa de microalgas pode fornecer três vezes mais cálcio e duas vezes mais ferro que os fertilizantes convencionais. O uso de microalga no contexto de biofertilizantes permite, dessa forma, a valorização estratégica de nutrientes e recursos (Das et al., 2019; Nayak et al., 2019; Silambarasan et al., 2021).

A substituição do fertilizante convencional pelo fertilizante de microalgas cultivadas em águas residuárias vem sendo estudada em diversos trabalhos, em que foram observados ganhos na taxa de crescimento de culturas e melhoria na qualidade e fertilidade do solo o que favorece o desenvolvimento sustentável da produção agrícola (Das et al., 2019; Renuka et al., 2016; Silva et al., 2019; Suleiman et al., 2020). Essa substituição é cada vez mais estudada diante dos impactos ambientais causados pelos fertilizantes convencionais. A aplicação do fertilizante convencional gera impactos ambientais como a eutrofização de corpos d'água e influencia indiretamente no aumento dos gases de efeito estufa, devido as emissões de NO_2 e NO causados, principalmente, pelas perdas de N via lixiviação de nitrato (NO_3^-), emissão de óxido nitroso (N_2O) e volatilização da amônia (NH_3) (Castro et al., 2017; Khan et al., 2019; Gregorich et al., 2015).

A produção de produtos à base de microalgas, assim como qualquer processo produtivo, influencia na geração ou mitigação de impactos ambientais. A avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma alternativa na avaliação desse aspecto ambiental e investiga os impactos associados a um produto, processo ou serviço, onde todas as entradas e saídas do sistema produtivo são copiladas. A busca por alternativas mais sustentáveis é alvo de diversos trabalhos, seja na produção de biodiesel de microalgas (Bussa e Zollfrank, 2020; Dasan et al., 2019; Hossain et al., 2019), produção de biogás a partir de microalgas (Kumar et al., 2020; Xiao et al., 2019) ou na produção de biofertilizantes (Arashiro et al., 2018; Castro et al., 2020a; Souza et al., 2019).

Diante do exposto, a inovação proposta foi produzir um fertilizante composto pela mistura de biomassa de microalgas originárias de águas residuárias e ureia para reduzir as perdas de amônia durante a sua aplicação sem comprometer a sua eficiência nutricional e, por fim, avaliar o aspecto ambiental quanto a geração de impactos. Para isso, a biomassa de microalgas foi gerada no tratamento de água residuária originária do processamento de carnes, para produção de um fertilizante organomineral. Para tanto, avaliou-se a mistura de microalgas e fertilizante químico (ureia). Foram investigados os efeitos da aplicação de um fertilizante organomineral pastilhado (FOP) quanto às perdas por volatilização de $N-NH_3$ e à capacidade de assimilação de N por plantas de milho (*Zea mays* L.), em comparação com o fertilizante comercial. Ao final, por meio de ACV, foram identificados os possíveis impactos ambientais associados à produção e aplicação do fertilizante proposto. Portanto, o trabalho foi dividido em dois capítulos:

- Capítulo 1: Aplicação de fertilizante organomineral a base de microalgas: efeitos na volatilização da amônia no solo e no crescimento de *Zea mays* L.

- Capítulo 2: Fertilizante organomineral a base de biomassa de microalgas: uma abordagem de ciclo de vida.

3. HIPÓTESES

A aplicação do FOP, composto pela mistura de biomassa de microalgas e fertilizante químico, promove a obtenção de resultados iguais ou superiores para conteúdo de N e crescimento das plantas de milho quando comparado ao fertilizante sintético.

O uso combinado de fertilizante sintético e biomassa de microalgas na produção de um FOP resulta em menor perda de N, via volatilização de $N-NH_3$, em relação ao fertilizante sintético, quando aplicado no solo.

Os impactos relacionados à cadeia produtiva FOP são menores quando comparado com o fertilizante sintético.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo Geral

Investigar o potencial técnico e ambiental do uso da biomassa de microalgas, cultivada em efluente agroindustrial por meio de LATs, para a produção de fertilizante organomineral pastilhado (biomassa de microalgas e fertilizante sintético), como alternativa aos fertilizantes convencionais.

4.2. Objetivos Específicos

- Verificar a melhor relação de mistura entre biomassa de microalgas e fertilizante sintético para a produção de FOP e avaliar seus efeitos no crescimento de plantas de milho;
- Utilizar as microalgas cultivadas em LATs com águas residuárias como meio de cultivo na produção de fertilizante organomineral e avaliar a influência desse fertilizante nas características químicas do solo;
- Avaliar as perdas de N, via volatilização de N-NH₃, por parte do fertilizante organomineral pastilhado em comparação ao fertilizante sintético;
- Avaliar o ciclo de vida da cadeia produtiva do fertilizante organomineral granulado, composto pela mistura de biomassa de microalgas e fertilizante químico, para o cultivo de plantas de milho e comparar os resultados com o fertilizante sintético.

5. ARTIGO 1: FERTILIZANTE ORGANOMINERAL PASTILHADO A PARTIR DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUAS RESIDUÁRIAS: VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E CRESCIMENTO DE PLANTASⁱ

Resumo

Com o aumento da demanda por alimentos é cada vez mais importante a manutenção da fertilidade do solo com a aplicação de fertilizantes para suprir as necessidades nutricionais das plantas. Porém, os nutrientes aplicados no solo podem sofrer perdas significativas, impactando o meio ambiente e aumentando os custos produtivos. Utilizar fontes alternativas, como a biomassa de microalgas (BM) geradas no tratamento de águas residuárias na produção de fertilizantes organominerais, é uma forma de recuperar nutrientes do esgoto, além de contribuir com a melhoria na fertilidade do solo e favorecer o crescimento de culturas, podendo garantir a viabilidade ambiental da produção agrícola. No presente estudo, a BM foi cultivada em efluente da indústria de alimentos e, posteriormente, foi produzido um fertilizante organomineral pastilhado (FOP) constituído pela combinação entre BM e fertilizante sintético (ureia), em diferentes proporções. O desempenho do fertilizante proposto foi analisado quanto às perdas por volatilização de amônia (N-NH₃) ao longo do tempo, quanto à capacidade de assimilação de nitrogênio (N) pelas plantas de milho (*Zea mays* L.) e sua estrutura foi analisada por meio da microscopia eletrônica de varredura. A maior volatilização acumulada de N-NH₃ foi na proporção de 40% de BM e o conteúdo máximo de N foi alcançado na proporção de 24,55% de BM. A partir da proporção de 25 % de BM não houve incremento de N absorvido pelas plantas, ao mesmo tempo em que a volatilização de N-NH₃ cresceu com o aumento de BM. Os fatores mais importantes foram a interação entre a BM e a ureia na pastilha de fertilizante organomineral produzida, onde uma barreira física cada vez mais espessa foi formada com o aumento da proporção de BM, além do pH do FOP, no qual o aumento das proporções de BM favoreceu diretamente o aumento do pH.

Palavras-chaves: Microalgas; Volatilização de amônia; Reciclagem de nutrientes; Fertilizante de nitrogênio.

ⁱ Artigo publicado: Pereira, A.S.A. de P., Castro, J. de S., Ribeiro, V.J., Calijuri, M.L., 2021. Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth. *Sci. Total Environ.* 779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146205>

5.1.Introdução

A constante necessidade de aumentar a produção alimentícia impõe encargos extras ao solo, fazendo com que a utilização de fertilizantes químicos seja inevitável. Porém, muito se discute sobre a eficiência desses fertilizantes diante das perdas no campo e seus impactos ao meio ambiente. Atrelado ao aumento populacional, processos de urbanização e industrialização, a geração de águas residuárias é cada vez maior e os impactos ambientais causados pelo lançamento sem o devido tratamento, são observados em todo o mundo. As águas residuárias são ricas em nutrientes (Craggs et al., 2014) e a recuperação destes pode ser realizada por meio do tratamento do efluente em Lagoas de Alta Taxa (LATS) (Kang et al., 2018; Singh et al., 2019; Zhu, 2015). Utilizar a biomassa de microalgas (BM) geradas no tratamento de águas residuárias na produção de fertilizantes organominerais é uma forma de recuperar nutrientes do esgoto, além de contribuir com a melhoria na fertilidade do solo e favorecer o crescimento de culturas, podendo garantir a viabilidade ambiental da produção agrícola.

Em 2018, no Brasil, a quantidade de fertilizantes nitrogenados consumidos para uso agrícola foi de 5 milhões de toneladas, onde 89,8 % dessa demanda é atendido por importação (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018). Entre os fertilizantes nitrogenados mais importados destacam-se a ureia (61 %), sulfato de amônio (25 %), nitrato de amônio (11 %) e amônia (3 %) (Ministério da Economia, 2019). A utilização desses fertilizantes nitrogenados implica em perdas de nitrogênio (N) via lixiviação de nitrato (NO_3^-), emissão de óxido nitroso (N_2O) e volatilização da amônia (NH_3) (Castro et al., 2017; Khan et al., 2019).

Entre os impactos ambientais causados por essas perdas, destacam-se a eutrofização de corpos d'água e a influência indireta no aumento dos gases de efeito estufa, devido as emissões de NO_2 e NO (Gregorich et al., 2015). Diversos trabalhos estudam alternativas para aumentar a eficiência dos fertilizantes nitrogenados de forma a minimizar essas perdas, seja pelo tipo de manejo ou pela utilização de fertilizantes de liberação lenta (Almeida and Sanches, 2012; Kitonyo et al., 2018; Zhang et al., 2016).

Uma alternativa é a produção de biofertilizante com a utilização de microalgas cultivadas em águas residuárias. A utilização de biofilme de microalgas favoreceu menores perdas de N, via volatilização de N-NH_3 , como observado por Castro et al. (2017), além de aumentar o teor de matéria orgânica do solo (MOS). Além disso, a produção de microalgas pode ocorrer em águas residuárias, promovendo a reciclagem de

nutrientes normalmente perdidos no tratamento convencional. Vários trabalhos avaliam a tratabilidade e a produção de BM em águas residuárias de diversas origens (Arbib et al., 2017; Craggs et al., 2014; García et al., 2017; Godos et al., 2009; Park et al., 2011). A valorização dessa biomassa via produção de biofertilizantes ainda é pouco investigada e pode ser vantajosa, uma vez que a aplicação de compostos orgânicos pode trazer inúmeros benefícios ao solo e as culturas (Bonanomi et al., 2020; Mandal et al., 2019; Yang et al., 2020).

O objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos da aplicação de um fertilizante organomineral pastilhado (FOP), quanto às perdas por volatilização de $N-NH_3$ e à capacidade de assimilação de N, por plantas de milho (*Zea mays* L.), em comparação ao fertilizante comercial. A inovação do presente trabalho, foi a produção de um FOP composto pela mistura em diferentes proporções de fertilizante sintético (ureia) e biomassa de microalgas gerada em LATs usando águas residuárias como meio de cultivo.

5.2. Material e Métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, Brasil, situado nas coordenadas 20°45'14"S, 42°52'54"W. O município possui clima úmido com verão chuvoso e inverno seco, com um déficit hídrico entre maio a setembro e excedente entre dezembro a março. Segundo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), considerando-se a série histórica de 1998 a 2017, a precipitação anual média é de 1.260 mm e a umidade relativa é de 79 %. A temperatura média durante o período de chuva, entre outubro a março, é de 20,3 °C e durante o período de seca, entre abril a setembro, é de 17,4 °C.

5.2.1. Produção e caracterização da biomassa de microalgas

A produção de biomassa de microalgas foi realizada em duas LATs em escala piloto, tendo como meio de cultivo um efluente rico em N para obtenção da BM. Foi utilizado o efluente de flotação primária proveniente de indústria de processamento de carnes, localizada no município de Viçosa, MG, Brasil. As características deste efluente são melhor descritas nos estudos realizados por Castro et al. (2017) e Souza et al. (2019).

As LATs utilizadas no experimento são construídas de fibra de vidro e possuem as seguintes características: largura de 1,28 m, comprimento de 2,86 m, profundidade total de 0,5 m, profundidade útil de 0,3 m, área superficial de 3,3 m² e volume de 1 m³. Para permitir um fluxo contínuo do efluente, existem pedais de aço inoxidável com seis lâminas, que são movimentados por motor elétrico de 0,5 cv. Para garantir uma velocidade de aproximadamente 0,10 a 0,15 m.s⁻¹ acopla-se, ao motor, um redutor controlado por inversor de frequência (marca WEG série CFW-10).

A operação das LATs foi realizada em batelada, durante um período de dezessete dias. Após o início do experimento, as variáveis clorofila-*a* e SSV foram monitoradas a cada três dias, até que se observou a fase de decaimento do crescimento algal. Após alcançar esse estágio, caracterizou-se a comunidade fitoplanctônica em termos qualitativos e quantitativos por meio de microscópio óptico invertido (Olympus CK2), segundo a metodologia de Utermöhl (1958). Foram analisados também a morfologia, morfometria, ciclos reprodutivos e vegetativos das espécies de valores taxonômico significantes, como descrito na literatura (Komarek and Fott, 1983; Parra et al., 1982; Wetzel et al., 1991). Assim, a caracterização taxonômica revelou as espécies de Chlorophyta (58,47 % *Chlorella vulgaris*, 1,17 % *Didymocystis inermis* e 2,93 % *Tetradescnus obliquus*) e uma espécie de Bacillariophyta (37,43 % *Navicula* sp.) como os principais filos presentes na biomassa de microalgas bruta. Quanto a composição bioquímica, foram obtidos 7,42 % de carboidratos, 2,49 % lipídios, 27,40 % proteínas e 32,99 % de material inerte.

Coletou-se a biomassa após o tratamento do efluente em batelada e estabelecimento do crescimento algal. Para esse procedimento, elevou-se o pH das lagoas até 12, por meio da adição de NaOH 50 % (v/v), seguida de intensa agitação manual. Posteriormente, as lagoas ficaram em repouso durante 24 horas para permitir a sedimentação da biomassa. Em seguida, o sobrenadante clarificado foi descartado e a biomassa sedimentada no fundo coletada. Após a coleta da biomassa, o pH foi neutralizado com a adição de HCl 1:1 (v/v). A biomassa foi congelada e, por fim, liofilizada para a remoção da umidade.

A biomassa seca foi analisada seguindo as especificações da Embrapa (2009) e obtiveram as seguintes características químicas: 504.400 mg kg⁻¹ de Carbono; 85.100 mg kg⁻¹ de Hidrogênio (H) ; 60.300 mg kg⁻¹ de Nitrogênio (N); 18.700 mg kg⁻¹ de Fósforo (P); 3.800 mg kg⁻¹ de Potássio (K); 26.600 mg kg⁻¹ de Cálcio (Ca); 6.100 mg kg⁻¹ de Magnésio (Mg); 14.900 mg kg⁻¹ de Sódio (Na), 27,91 mg kg⁻¹ de Cobre (Cu); 4.462,20

mg kg⁻¹ de Ferro (Fe); 367,32 mg kg⁻¹ de Zinco (Zn); 74,70 mg kg⁻¹ de Manganês (Mn); 11,05 mg kg⁻¹ de Níquel (Ni); 5,10 mg kg⁻¹ de Chumbo (Pb); 25,58 mg kg⁻¹ de Cromo (Cr).

5.2.2. Produção do fertilizante organomineral

A produção do fertilizante organomineral foi realizada por meio do molde de pastilha constituído em aço inoxidável. Inicialmente, foi necessário submeter ao processo de maceração, tanto a biomassa de microalgas seca quanto o fertilizante sintético (ureia granulada), separadamente, para obtenção de um material de menor granulometria. Tal procedimento foi realizado em almofariz e, posteriormente, peneirado em peneira com malha de 100 mesh.

Posteriormente, estes materiais foram pesados nas devidas proporções e misturados com goma arábica líquida em um béquer até a homogeneidade. Essa mistura levemente úmida foi prensada no molde de pastilha, seguido de secagem a 35 °C em estufa de circulação forçada para remoção da umidade das pastilhas. Ao final, os fertilizantes pastilhados foram analisados visualmente por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) JSM-6010LA e o pH destes foram determinado conforme descrito por Almeida et al. (2012).

5.2.3. Caracterização do solo

Para montagem deste experimento foram utilizadas amostras subsuperficiais (20 - 40 cm) de um Latossolo Vermelho-Amarelo, coletado na região de Viçosa – MG. O material coletado foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA). As análises para a determinação das características físicas e químicas do solo foram realizadas conforme Teixeira et al. (2017) e Almeida et al. (2012) e os resultados estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Características físico-químicas do solo utilizado.

Características físicas do solo		
Areia Grossa ⁽¹⁾	14,5	%
Areia fina ⁽¹⁾	9,4	%
Silte ⁽¹⁾	7,2	%
Argila ⁽¹⁾	68,9	%
Características químicas do solo		
pH em água ⁽²⁾	4,52	-
Nitrogênio (N) ⁽³⁾	0,14	dag kg ⁻¹
Matéria Orgânica (MO) ⁽⁴⁾	3,29	dag kg ⁻¹
Fósforo (P) ⁽⁵⁾	0,60	mg dm ⁻³
Fósforo Remanescente ⁽⁵⁾	6,40	mg L ⁻¹
Soma de bases trocáveis ⁽⁶⁾	0,18	cmol _c dm ⁻³
H + Al ³⁺ ⁽⁶⁾	7,70	cmol _c dm ⁻³
Potássio (K) ⁽⁵⁾	11,0	mg dm ⁻³
Cálcio (Ca ²⁺) ⁽⁷⁾	0,12	mg dm ⁻³
Magnésio (Mg ²⁺) ⁽⁷⁾	0,03	mg dm ⁻³
Alumínio (Al ³⁺) ⁽⁷⁾	1,07	mg dm ⁻³
Enxofre (S) ⁽⁸⁾	ND	mg dm ⁻³
Boro (B) ⁽⁹⁾	0,31	mg dm ⁻³
Cobre (Cu) ⁽⁵⁾	0,40	mg dm ⁻³
Manganês (Mn) ⁽⁵⁾	2,00	mg dm ⁻³
Ferro (Fe) ⁽⁵⁾	99,30	mg dm ⁻³
Zinco (Zn) ⁽⁵⁾	0,37	mg dm ⁻³

¹Método de pipeta (Almeida et al., 2012); ²Razão solo/água 1:2.5; ³Método Nitrogênio Total-Kjeldhal (Teixeira et al., 2017); ⁴Nelson e Somers (1982); ⁵Extrator Mehlich (Embrapa, 2009); ⁶Método de extração de acetato de cálcio 0.5 mol/L- pH 7.0 (Embrapa, 2009); ⁷Método de extração de cloreto de potássio 1 mol/L (Embrapa, 2009); ⁸Extrator-Fosfato monocálcico em ácido acético (Embrapa, 2009); ⁹Extrator água quente (Embrapa, 2009). ND-não detectável.

5.2.4. Design experimental

Dois experimentos foram conduzidos, um para avaliar a influência do FOP na volatilização de N-NH₃ no solo e outro para verificar a influência da fonte de nutrientes para as plantas. Os experimentos foram organizados em delineamento de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições por bloco.

Todos os tratamentos receberam as fontes de N equivalente a 100 mg dm⁻³ com exceção do controle, onde não foi adicionado nenhuma fonte de N. Os tratamentos estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Descrição dos tratamentos observados no presente estudo.

Tratamento	Descrição
MBU5	Ureia + 5 % de Biomassa de Microalga
MBU15	Ureia + 15 % de Biomassa de Microalga
MBU30	Ureia + 30 % de Biomassa de Microalga
MBU40	Ureia + 40 % de Biomassa de Microalga
MBU50	Ureia + 50 % de Biomassa de Microalga
UR	Apenas ureia

Em todos os experimentos, as amostras de solo (2 dm³) foram dispostas em sacos plásticos para realização da calagem, pelo método da neutralização do Al³⁺ e elevação dos teores de Ca²⁺ + Mg²⁺ (Ribeiro et al., 1999), com a correção do pH a 6.0. Em seguida, ajustou-se a umidade do solo para 80 % da capacidade de campo. Após 21 dias de incubação, o solo foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira de 2 mm (TFSA). Os experimentos descritos a seguir, foram conduzidos em casa de vegetação localizada no LESA.

5.2.4.1. Quantificação da volatilização de N-NH₃ das fontes nitrogenadas

O experimento foi conduzido em casa de vegetação durante trinta dias. As unidades experimentais constituíram-se por anéis de PVC, de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Com o auxílio do funil, cada base foi preenchida com amostras de 0,5 dm³ de terra fina seca ao ar (TFSA) através de movimentos circulares para evitar a segregação dos agregados de solo.

Após esse processo, foi aplicada ao solo uma solução multi-nutriente sem N (Novais et al., 1991), além de água para que o solo alcançasse 80 % da capacidade de campo. Nos três dias seguintes, as bases preenchidas de solo foram mantidas à temperatura de 25 °C para aclimação da biota do solo e produção de urease (Koefender et al., 2013). Ao final desse período, os FOP foram aplicados no solo de forma superficial no centro dos anéis. Imediatamente após a aplicação do fertilizante, uma câmara coletora (Araújo et al., 2009) foi instalada sobre a base para aprisionar e coletar a N-NH₃ liberada pelo fertilizante.

A câmara para a quantificação da volatilização de N-NH₃ funcionou em sistema livre estático (SALE) e foi desenvolvida seguindo a metodologia de Araújo et al. (2009). As câmaras coletoras foram confeccionadas a partir de frasco plástico transparente de politereftalato de etileno (PET) com base removida, diâmetro 10 cm e área igual a 80 cm² (Figura 5.1). No interior do frasco, foi instalado um sistema absorvedor suspenso verticalmente, composto por uma lâmina de espuma de poliuretano com as seguintes dimensões: 3,0 mm de espessura, 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento. A espuma foi afixada por meio de um fio rígido, 1,5 mm de diâmetro, acoplado a tampa do frasco PET. No momento da instalação, adicionou-se um frasco de 50 mL de capacidade contendo 10 mL de solução de H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ + glicerina 2 % (v/v).



Figura 5.1. Câmara de quantificação de volatilização de amônia.

Durante a instalação do sistema absorvedor de N-NH₃, a lâmina de espuma foi comprimida em frasco com solução ácida, para absorver a maior quantidade possível dessa solução. A lâmina de espuma permaneceu no frasco fechado até o instante da instalação. A extremidade inferior da lâmina foi mantida dentro do frasco de 50 mL para evitar respingos da solução ácida no solo. Para manter a espuma na posição vertical, a extremidade da espuma foi afixada à parte superior do fio rígido. Assim, o fio rígido juntamente com o frasco de 50 mL e a espuma embebida de ácido, foram pendurados pela borda superior e suspensos a 1,5 cm da superfície do solo.

O N-NH₃ volatilizado foi captado na forma de (NH₄)₂SO₄. Foram retiradas amostras durante os trinta dias juntamente com o experimento de condução do milho, sendo que as avaliações foram realizadas no 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 6º, 7º, 8º, 10º, 12º, 17º, 23º e 30º dias.

5.2.4.2. Avaliação da eficiência das fontes na cultura do milho *Zea mays L.*

Para cultivo da cultura em vasos de 2 dm³, foram semeadas seis sementes de milho (Biomatrix BM709 PR02), a 2 cm de profundidade, distribuídos uniformemente (Figura 5.2). Os fertilizantes foram aplicados no solo, na forma sólida, sobre a superfície de forma centralizada. Uma solução multi-nutriente sem N foi adicionada no 1º, 10º e 20º dias após a semeadura seguindo a metodologia de Novais et al. (1991). Após sete dias, realizou-se os desbastes deixando apenas três plantas por vaso.



Figura 5.2. Experimento de avaliação da eficiência das fontes na cultura de milho.

A umidade do solo foi controlada diariamente para manter a capacidade de campo em torno de 80 %. Após trinta dias de cultivo, as plantas de milho foram seccionadas a 0,5 cm do solo e, posteriormente, acondicionadas em sacos de papel e levados à estufa de circulação forçada de ar à 60 °C, (até peso constante) para obtenção da massa de matéria seca da parte aérea (mMSPA). Em seguida, foram moídas para determinação do teor de N, digerindo-se 0,5 g de mMSPA, com H₂SO₄ e H₂O₂ adicionando a mistura de digestão (Na₂SO₄, CuSO₄.5H₂O) seguida da destilação de arraste de vapor semimicro Kjeldahl, segundo Tedesco et al. (1995).

Ao final, obteve-se o conteúdo de N na planta multiplicando-se os teores dos nutrientes pelos respectivos valores de mMSPA (Equação 5.1):

$$C = \text{mMSPA} \times T \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Em que:

C = conteúdo do nutriente (mg vaso⁻¹);

mMSPA = massa de matéria seca da parte aérea (g vaso⁻¹);

T = teor do nutriente (g kg⁻¹).

Realizou-se também o cálculo de taxa de recuperação (TR) de N (Equação 5.2):

$$\text{TR (\%)} = \frac{(\text{CNT} - \text{CNC})}{(\text{QNA})} * 100 \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Em que:

CNT = conteúdo de N na parte aérea do tratamento fertilizado (mg vaso⁻¹);

CNC = conteúdo de N na parte aérea do tratamento controle (mg vaso⁻¹);

QNA = quantidade de N total adicionada (mg vaso⁻¹).

5.2.5. Análise estatística

Os resultados da determinação de N-NH₃ volatilizada em função do tempo de incubação foram ajustados à equação logística (Equação 5.3) utilizando o software Curve Expert 1.4 (Hyams, 1997).

$$Y = a / (1 + \exp^{-(b+cx)}) \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Os teores de N absorvidos pela planta ao final do experimento, assim como os valores de N-NH₃ volatilizado, foram submetidos a análise de regressão ao nível de 5 % de probabilidade de erro, pelo software Minitab® 15.1.30.0.

Por fim, os valores cumulativos de N-NH₃ volatilizado observados nos tratamentos com FOP e ureia convencional foram comparados pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%.

5.3.Resultados

Os dados obtidos nos experimentos estão apresentados da seguinte forma: (i) computou-se os dados obtidos durante o experimento de volatilização de amônia; (ii) em seguida, analisaram-se os dados fornecidos durante o cultivo das plantas de milho a respeito da taxa de recuperação de N, produção de massa de matéria seca e acúmulo de macro e micronutrientes; (iii) e, por fim, caracterizou-se microscopicamente a estrutura do fertilizante.

5.3.1. Volatilização de N-NH₃

As emissões de N-NH₃ observadas nos seis tratamentos e controle são apresentadas na Figura 5.3a. Após a aplicação do FOP, as emissões de N-NH₃ aumentaram e o pico de emissão ocorreu no terceiro dia de experimento. Outros picos de volatilização também foram observados, no 10º e 17º dia do experimento. Para todos os tratamentos, a volatilização de N-NH₃ diminuiu gradativamente com o tempo. As perdas cumulativas estão representadas na Figura 5.3b. Tais perdas aumentaram com o passar do tempo até os sete primeiros dias, seguido da estabilização, indicando que este processo aconteceu de forma rápida. Em particular, as perdas acumulativas de volatilização de N-NH₃ apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos em que foi adicionada a BM e o tratamento em que foi aplicado somente UR. Pelo teste de Tukey, foi observado que não houve diferença estatística significativa ($p>0,05$) entre os tratamentos em que foi adicionada BM. A maior volatilização acumulada foi obtida no fertilizante composto por 40 % de BM.

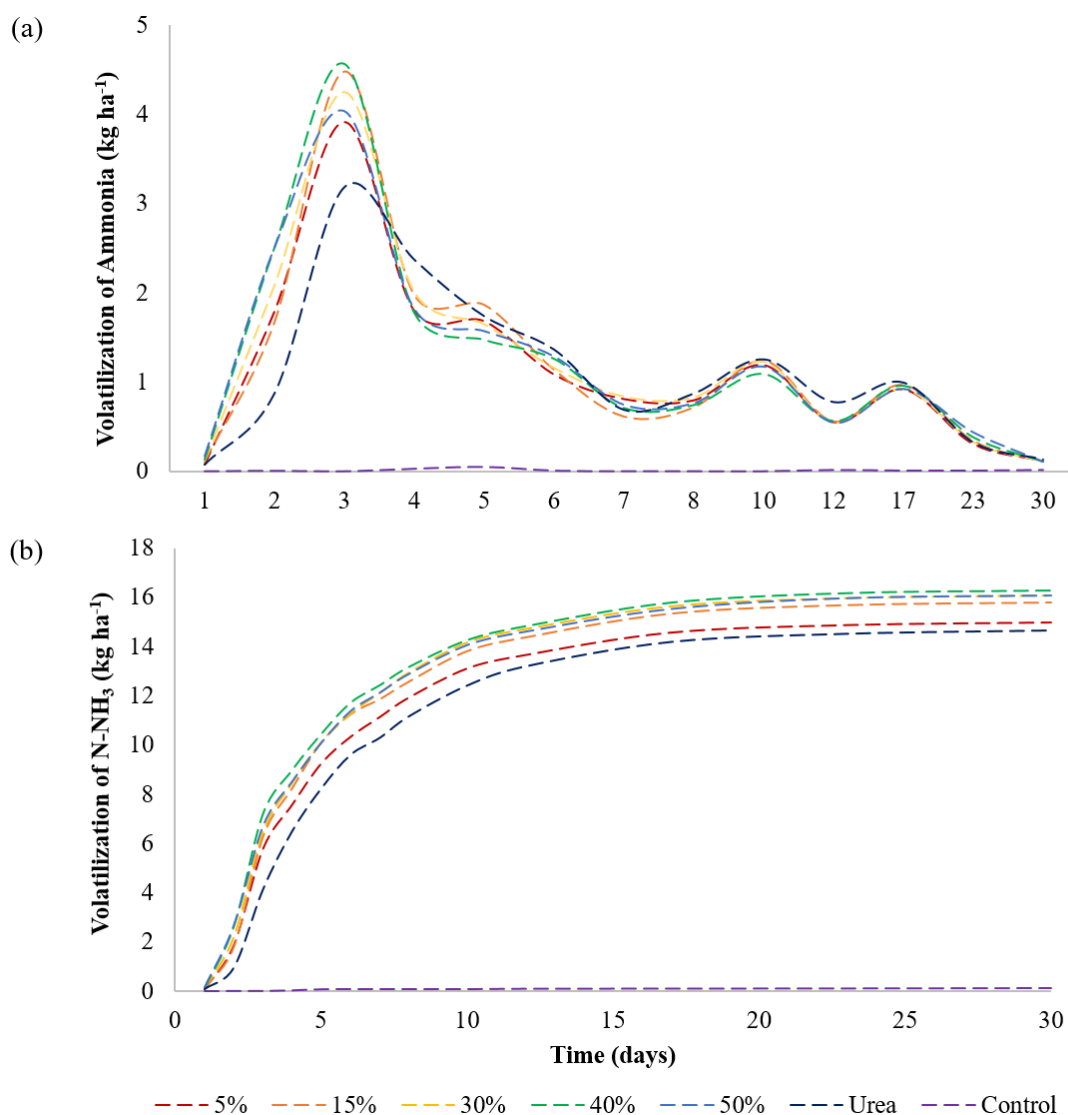


Figura 5.3. Perdas diárias (a) e acumulativas (b) de volatilização de N-NH₃ após a aplicação das diferentes fontes de N ao longo do tempo.

As emissões acumuladas de N-NH₃ em função do percentual de BM nos fertilizantes seguiram o modelo de regressão linear ($p < 0,05$), conforme demonstrado na Figura 5.4. Observou-se que o aumento da proporção de BM favoreceu o processo de volatilização. Apesar da BM ter formado uma barreira física no grânulo do fertilizante, ela não impediu que a volatilização de N-NH₃ acontecesse. Por outro lado, a diferença na volatilização, em termos de ordem de grandeza não foi expressiva. Sendo assim, o resultado obtido no crescimento de plantas pode compensar o resultado negativo da volatilização, visto que o objetivo foi atingir uma sincronia entre liberação do nutriente, absorção do mesmo pela planta e minimização das perdas de N por volatilização.

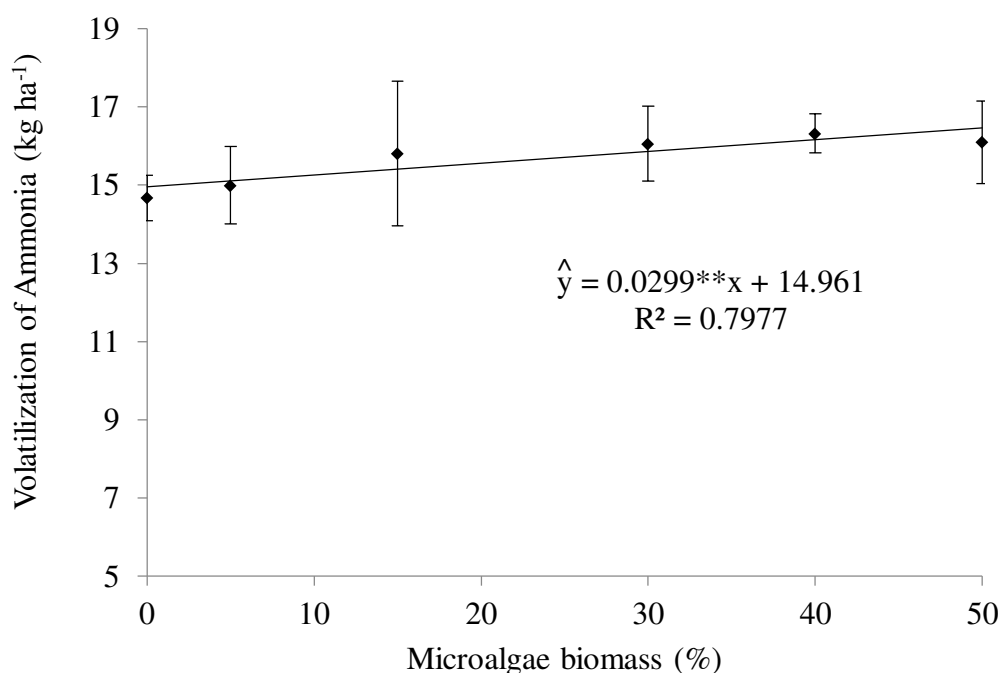


Figura 5.4. Volatilização acumulada (kg ha⁻¹) em função das diferentes taxas de BM aplicada. ** significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

Os valores da volatilização acumulada ao longo do tempo também foram ajustados a equação logística [$Y = a/(1+\exp^{-(b+cx)})$] com o objetivo de entender o comportamento de cada fertilizante testado frente a coeficientes relacionados à liberação dos mesmos no ambiente. Na Tabela 5.3 são apresentados os coeficientes obtidos para cada tratamento. O coeficiente “a” representa o ponto de saturação da curva, ou seja, o máximo acúmulo de N-NH₃ volatilizado; “b” representa parâmetro de posição que desloca a curva em relação ao eixo x, assim, quanto maior o seu valor, maior é o tempo para atingir o máximo de volatilização de N-NH₃; e “c” está relacionado com a taxa de crescimento da função e, portanto, é diretamente associado à volatilização de N-NH₃.

Por meio da obtenção desses coeficientes foi possível estimar o tempo necessário para alcançar metade da emissão máxima de N-NH₃ ($t^{1/2}$) que indica o tempo em que ocorreu a inflexão da curva. Esse valor infere sobre a velocidade no tempo (dias) e a emissão de N-NH₃ volatilizado.

Tabela 5.3. Coeficientes da equação logística e tempo necessário para atingir a metade da produção máxima de N-NH₃ volatilizado durante um período de trinta dias.

Tratamentos	Coeficientes da equação logística				r	S
	a ⁽¹⁾	b ⁽¹⁾	c ⁽¹⁾	t ^{1/2}		
MBU5	14,20	-2,51	0,59	4,23	0,98	1,01
MBU15	14,84	-2,60	0,64	4,07	1,00	0,98
MBU30	15,21	-2,49	0,61	4,09	0,98	1,08
MBU40	15,21	-2,57	0,66	3,86	0,98	1,17
MBU50	15,08	-2,53	0,63	4,00	0,98	1,09
UR	13,83	-2,84	0,60	4,72	0,99	0,93

⁽¹⁾ Equação logística $Y = a/(1+\exp^{-(b+cx)})$; MBU5 = 5 % de BM + ureia; MBU15 = 15 % de BM + ureia; MBU30 = 30 % de BM + ureia; MBU40 = 40 % de BM + ureia; MBU50 = 50 % de BM + ureia; UR = ureia.

Analisando a equação logística (Tabela 5.3), os tratamentos que apresentaram maiores valores de saturação de N-NH₃ acumulativos (coeficiente “a”) apresentaram uma tendência crescente com o aumento de BM no fertilizante, apontando que proporções maiores de biomassa de microalga favoreceram a volatilização de N-NH₃. Além disso, esses tratamentos também obtiveram maiores taxa de crescimento da função logística (coeficiente “c”), indicando que o processo de volatilização aconteceu mais rapidamente nestes.

O aumento na volatilização de N-NH₃ em função do aumento da proporção de BM pode estar relacionado a dois fatores principais: o pH dos FOP e a forma de aplicação do fertilizante no solo. Quanto aos resultados referentes ao parâmetro de pH dos FOP produzidos, foram observados os seguintes valores: 8,58 (MBU5); 9,17 (MBU15); 9,52 (MBU30); 9,42 (MBU40); 9,55 (MBU50); e 6,75 (UR). Observou-se uma tendência alcalina à medida que as proporções de BM foram aumentadas na composição do FOP e o fertilizante UR inclinou-se para um pH de neutralidade. Os altos valores de pH podem ser decorrentes do processo de coleta da biomassa, devido à elevação do pH que permite a sedimentação e separação entre biomassa algal e sobrenadante. Apesar da posterior correção do pH, a biomassa algal reestabeleceu-se na forma alcalina após a secagem.

Esses resultados podem influenciar diretamente no pH do solo e, conseqüentemente, na taxa de volatilização de N-NH₃ e na taxa de incorporação de nutrientes pelas plantas. A forma de aplicação utilizada neste estudo pode ter favorecido

a volatilização de N-NH₃, de forma que a aplicação superficial expôs FOP a condições de temperatura e umidade.

5.3.2. Eficiência das fontes de N na cultura de milho *Zea mays* L.

5.3.2.1. Taxa de recuperação de N pelas plantas

A presença de BM no FOP influenciou a absorção de N nas plantas de milho. Os resultados do conteúdo de N em função do percentual de BM aplicado seguiram o modelo de regressão quadrático ($p < 0,05$) conforme apresentado na Figura 5.5.

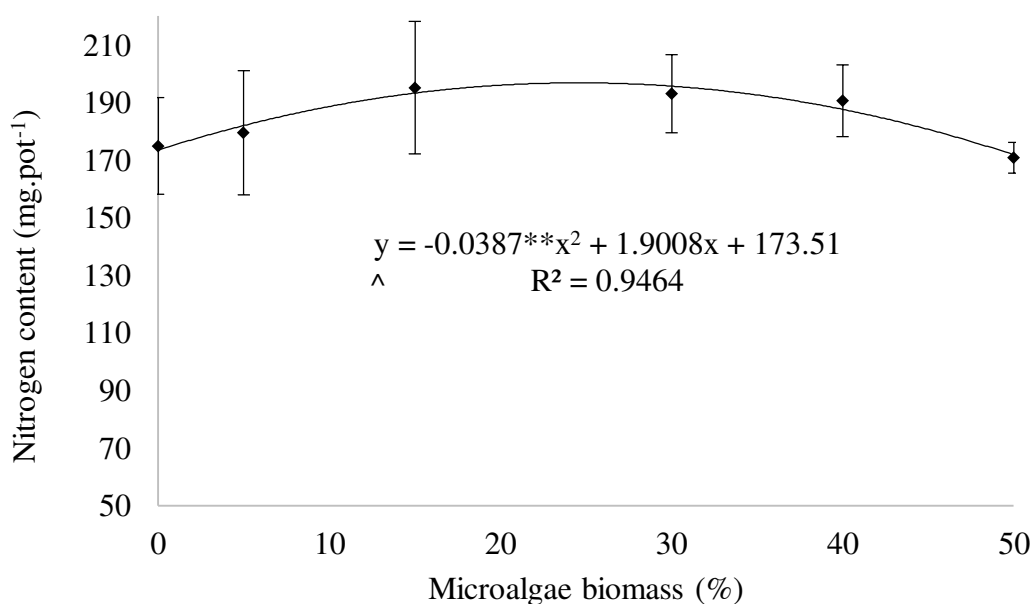


Figura 5.5. Conteúdo de N (mg vaso⁻¹) da parte aérea da planta de milho (*Zea mays* L.) em função das concentrações de Biomassa de Microalga (%) presente no FOP.

** significativo a 5 % de probabilidade pelo teste *t*.

Em análise, o conteúdo de N na planta atingiu o máximo na proporção de 24,55 % de BM e alcançou 196,85 mg vaso⁻¹ de N, ou seja, a partir dessa proporção não ocorreu incremento no conteúdo de N absorvido pela planta com o aumento da BM. A taxa de recuperação de N pelas plantas foi de 46,43 % em MBU5; 54,23 % em MBU15; 53,18 % em MBU30; 51,93 % em MBU40, 42,03 % em MBU50; e 44,11 % em UR. Assim, o aumento da proporção de BM possibilitou a absorção de mais N pela planta até determinada proporção. Entretanto, a partir do ponto de inflexão da curva, onde a

concentração de BM é de aproximadamente 25 %, a taxa de recuperação de N tendeu ao declínio e, portanto, a proporção ideal para a produção do FOP deve estar entre 15 a 30% de MB.

5.3.2.2. Produção de massa de matéria seca de plantas e acúmulo de macro e micronutrientes

A aplicação do FOP influenciou a produção mMSPA, bem como no teor de macro e micronutrientes na parte aérea das plantas de milho (Figura 5.6). O tratamento que obteve maior produtividade, ou seja, maior mMSPA foi o tratamento MBU50 seguido do MBU5, MBU40, MBU15, MBU30 por último UR.

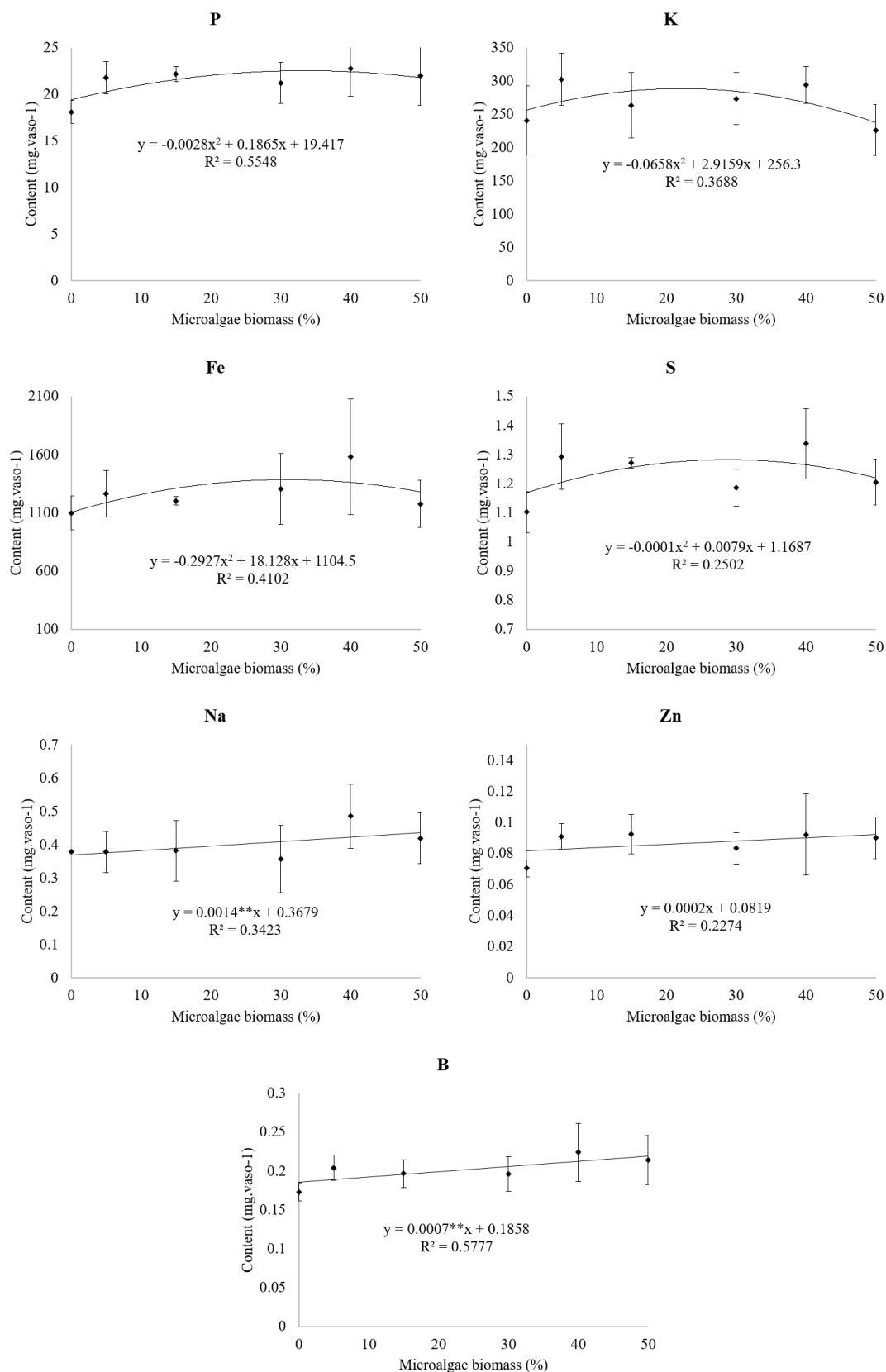


Figura 5.6. Conteúdo de macro e micronutrientes presente nas plantas ao final do experimento.

Apesar da adição de solução multi-nutriente em todos os tratamentos, os macros e micronutrientes presentes na BM podem ter exercido resultado positivo na composição química das plantas. Exemplo disso são os elementos Boro (B) e Sódio (Na) que seguiram regressão linear ($p < 0,05$), onde observou-se que o aumento de BM favoreceu positivamente a concentração destes micronutrientes. A presença de Na nas plantas foi decorrente da adição de NaOH durante o processo de colheita da biomassa algal. Para os demais macros (P e K) e micronutrientes (Fe, S, Zn), foi observado um comportamento de regressão quadrática ou linear não significativo ($p > 0,05$). Os altos valores de Fe podem ser decorrentes do tipo de solo utilizado no experimento, mas a presença de BM pode ter aumentado a disponibilidade desse nutriente e, conseqüentemente, aumentado a absorção pela planta. Este resultado pode ter sido influenciado pela dinâmica de liberação dos nutrientes presentes na MB.

5.3.3. Caracterização do Fertilizante Organomineral Pastilhado

Na Figura 5.7a, referente às pastilhas de UR, observou-se que os cristais que formam o fertilizante encontraram-se em maior tamanho e mais visíveis quando comparados aos FOP produzidos. À medida em que a proporção de biomassa de microalgas no fertilizante aumenta (Figura 5.7b, c, d, e, f), os cristais de ureia se tornam proporcionalmente mais “revestidos” e menos visíveis.

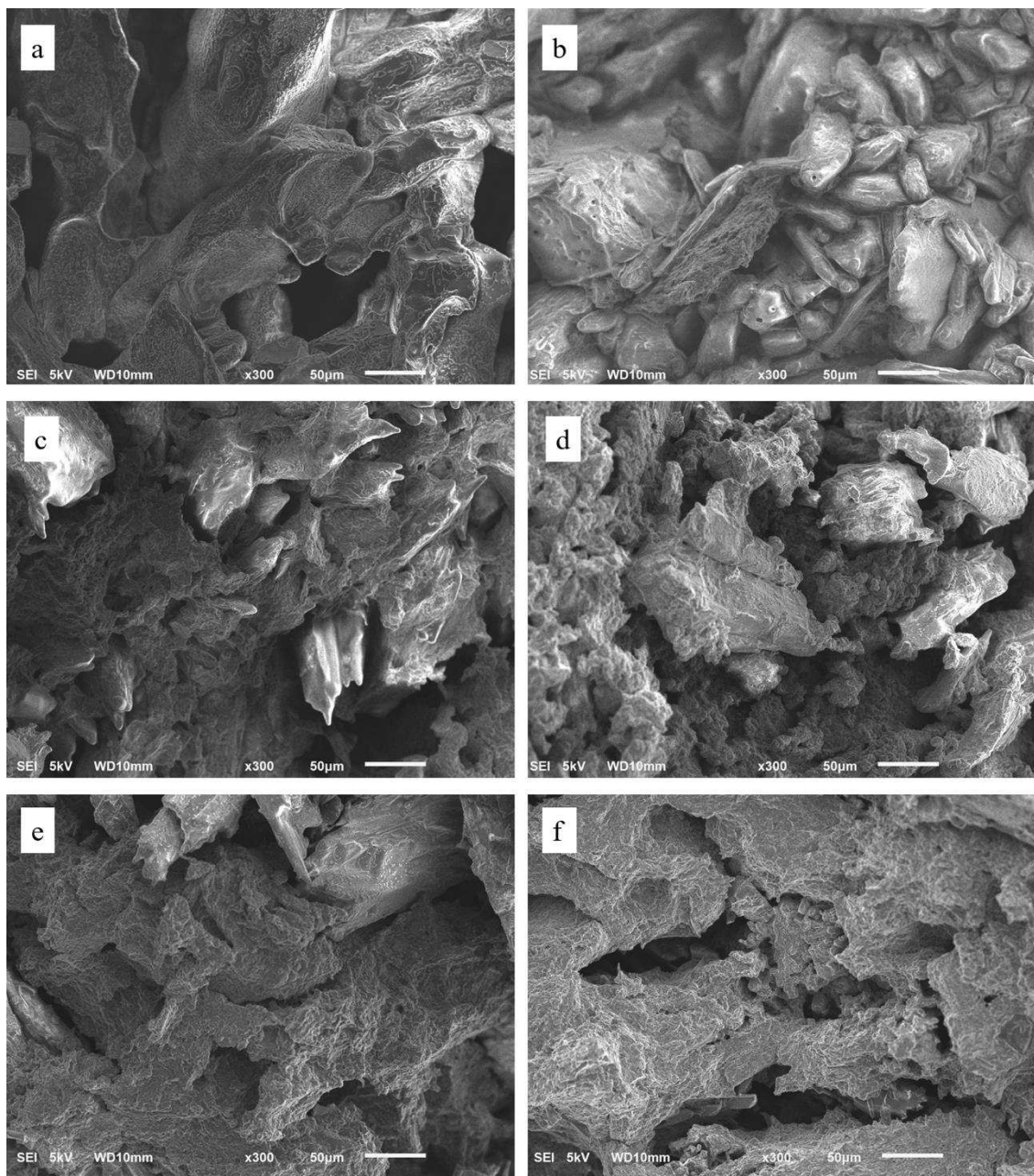


Figura 5.7. Imagem das pastilhas de fertilizantes produzidas por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). (a) UR; (b) MBU5; (c) MBU15; (d) MBU30; (e) MBU40; (f) MBU50.

A disponibilidade de N pode estar associada à alguns fatores. O revestimento dos grânulos do fertilizante pela matéria orgânica é um dos fatores que pode ter atuado como barreira física, afetando a liberação de N e, simultaneamente, pode ter favorecido macro e micronutrientes presentes na MB. Assim, à medida que este nutriente for liberado, tanto a disponibilidade e assimilação de N das plantas, quanto as taxas de volatilização de $N-NH_3$ do solo podem ser influenciadas.

5.4. Discussão

Diversas abordagens técnicas vêm sendo estudadas para diminuir a volatilização de N-NH₃ por meio de biofertilizante ou pela combinação entre fertilizantes sintéticos e compostos orgânicos, como é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Resultados de estudos a respeito da volatilização de N-NH₃ no solo.

Fontes	Método de Aplicação	N (kg ha ⁻¹)	Tempo de experimento (dias)	Volatilização de N-NH ₃ (kg ha ⁻¹)	Taxa de volatilização (%)	Referência
MBU5				15,00	7,50	
MBU15	Sólido e aplicação superficial	200	30	15,81	7,91	Este estudo
MBU30				16,08	8,04	
MBU40				16,29	8,15	
MBU50				16,10	8,05	
Biofertilizante						
Ureia + <i>Azolla</i> + inibidor de uréase	Líquido e aplicação superficial	272	7	17,95	5,46	Yang et al. (2020)
Ureia		270		40,00	13,70	
Biochar neutro de esterco de aves				120	20,00	
Biochar neutro de resíduo verde	Sólido e incorporado ao solo	600	30	140	23,33	Mandal et al. (2019)
Solo + NPK				380	63,33	
Biofilme de microalgas produzidas em águas residuárias	Líquido e aplicação superficial no solo	120	60	5,55	4,63	Castro et al. (2017)
Biochar de palha de trigo + Ureia	Sólido e incorporado ao solo	360	70	83,86	23,29	Sun et al. (2017)
Ureia		400		54,60	13,65	

Observou-se que o processo de volatilização de N-NH₃ apresentou resultados que condizem ao que foi observado em outros trabalhos que aplicaram fontes orgânicas no solo (Yang et al., 2020; Castro et al., 2017; Sun et al., 2017; Mandal et al., 2019). O pico

de volatilização ocorreu no terceiro dia de experimento, seguido de uma queda acentuada, assim como foi observado por Yang et al. (2020) que investigaram os efeitos das combinações de *Azolla*², ureia e inibidor de urease na volatilização de N-NH₃ e na produtividade do arroz e observaram que o pico principal de volatilização ocorreu entre o segundo e terceiro dia de experimento, seguidos de picos secundários em menor escala para um experimento de campo. Além disso, Yang et al. (2020) também observaram que do total aplicado (270 kg N ha⁻¹), 13,70 % foram perdidos via volatilização no tratamento ureia e a maior redução foi no tratamento combinado entre ureia, *Azolla* e inibidor de urease, reduzindo assim, o volatilizado acumulado de N-NH₃ pela metade. Em todos os tratamentos avaliados por Li et al. (2018), o pico de volatilização foi atingido no primeiro ou segundo dia após a aplicação do fertilizante N, seguido por uma acentuada queda e o fluxo quase desapareceu após o quinto dia.

A presença de compostos orgânicos pode influenciar o aumento ou diminuição da volatilização de N-NH₃. Esses compostos orgânicos também estão diretamente relacionados a fórmula química em que o N fica disponível para a planta. No entanto, diversos fatores externos tais como temperatura, umidade e pH do solo podem determinar como esses dois processos irão acontecer, além das próprias características do fertilizante utilizado.

As características físico-químicas das pastilhas de fertilizantes produzidas também podem explicar muitos dos efeitos observados. Como observado na Figura 5.7, os cristais de ureia foram revestidos pela BM podendo afetar a disponibilidade de N e nas suas perdas via volatilização de N-NH₃. Esse revestimento pode ter atuado como barreira física durante a liberação do nutriente, como observado por (Castro et al., 2020) que investigaram os efeitos da biodisponibilidade de P no solo provocados pela aplicação de um fertilizante granulado, composto por superfosfato triplo combinado com MB.

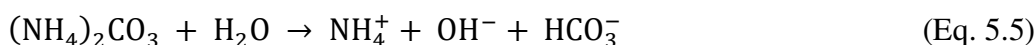
Diversos fatores podem influenciar, direta e indiretamente, a volatilização de N-NH₃. Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para acompanhar e entender melhor os processos químicos e biológicos que regem tal processo. Matsushima et al. (2009), ao avaliarem os efeitos interativos de tipos de compostos derivados de esterco de gado (baixa e alta atividade de urease) e da forma de fertilizantes sintéticos (ureia e sulfato de amônio) na volatilização de N-NH₃, observaram que a aplicação tanto de ureia quanto de sulfato

² *Azolla* é uma pteridófita aquática que fixa o N atmosférico e forma uma associação simbiótica com cianobactérias, *Anabaena azollae*. *Azolla* é um fixador de N eficiente e de crescimento rápido (Subedi and Shrestha, 2015).

de amônio, independentemente do tipo de composto, resultando no aumento da volatilização de N-NH₃, em comparação com os tratamentos sem composto. Matsushima et al. (2009) atribuíram esse comportamento ao pH alcalino do composto, por volta de 8,0 e, assim, a aplicação do composto pode resultar no aumento do pH.

A perda por volatilização de N-NH₃ é influenciada por diversos fatores, principalmente pelo pH. O equilíbrio entre o íon amônio (NH₄⁺) e a amônia (NH₃) dita como ocorrerá a disponibilidade de cada um desses elementos, ao modo que em pH ácido a forma predominante é o NH₄⁺. Tasca et al. (2011) avaliaram, em condições laboratoriais, o efeito do pH (4,0; 5,5; 6,3 e 6,8), temperatura (18 e 35°C), dose (100 e 190 kg ha⁻¹) na volatilização de N-NH₃. A perda diária observada no estudo de Tasca et al. (2011) foi influenciada pelo aumento da temperatura, onde a volatilização de N-NH₃ foi 4,6 vezes menor nos tratamentos à 18°C em relação aos observados à 35 °C. Solos com pH mais alcalinos também proporcionaram o aumento da volatilização. Portanto, neste estudo, onde a temperatura média variou entre 23,6 °C e 18,4 °C, o processo de volatilização de N-NH₃ foi favorecido pela temperatura em que o experimento foi conduzido.

O efeito da temperatura está diretamente relacionado à aceleração do processo de hidrólise da ureia que libera N amoniacal. A temperatura e o pH estão intimamente ligados à hidrólise da ureia [CO(NH₂)₂]. Este processo ocorre devido a enzima urease, resultando na formação de carbonato de amônio ((Equação 5.4) que, rapidamente, se decompõe em amônio, bicarbonato e hidroxila elevando o pH ao redor das pastilhas de fertilizante (Equação 5.5). Dessa forma, o NH₄⁺ é convertido em NH₃ (Equação 5.6) que pode se perder para a atmosfera, caso não seja incorporada no solo (Novais et al., 2007).



Dessa forma, o aumento do pH é provocado pela reação de hidrólise por meio do consumo de prótons e, portanto, a ureia está sujeita a volatilização mesmo em solos ácidos (Novais et al., 2007). Interessantes avanços científicos vêm sendo desenvolvidos para

solucionar essa problemática a respeito da elevação do pH e, conseqüente, aumento das taxas de volatilização de N-NH₃. Exemplo disso são as pesquisas com biochar de pH neutro derivados do esterco de aves e de resíduos vegetais que obtiveram reduções de 47 % e 38 % das emissões de N-NH₃ (Mandal et al., 2019). Estes pesquisadores ainda constataram que o aumento da biomassa vegetal é decorrente das reduções das emissões de N-NH₃, ou seja, reduzir as perdas via volatilização proporcionou o aumento do suprimento de N para as plantas. Sun et al. (2017) avaliaram o potencial do biochar derivado da palha de trigo aplicado com taxas variadas em peso no retardo das perdas de N por lixiviação e volatilização de N-NH₃ em solos salinos. Os resultados mostraram que as maiores cargas de volatilização ocorreram nos tratamentos com 2% e 4 % de biochar e concluíram que esse aumento da volatilização de 25,6 % e 53,6 %, respectivamente, foi induzido pela adição de biochar alcalino.

O pH dos FOP avaliados neste trabalho pode ter influenciado diretamente no pH do solo, devido a sua tendência alcalina e favorecido o processo de volatilização de N-NH₃. A etapa de colheita da biomassa influenciou o aumento do pH para promover a sedimentação e separação da biomassa e o sobrenadante por meio da adição de um agente químico. Essa etapa ainda é um gargalo para a produção de biomassa algal, porém trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de melhorar a colheita e separação de microalgas (Assis et al., 2020; Ferreira et al., 2020). Assis et al. (2020) propuseram um sistema híbrido, em escala piloto, composto por um reator de biofilme acoplado à um sistema de tratamento de efluentes, formado por LATs e decantação. Este sistema indica um aumento na produção e colheita de MB, em comparação com sistema composto apenas pelas LATs. Ferreira et al. (2020), comparando diferentes métodos de colheita de biomassa, observaram que o desempenho foi melhor no método que utiliza o tanino como coagulante, com posterior sedimentação gravitacional. Assim, o uso de novas metodologias na etapa de colheita de BM pode favorecer o desempenho dos FOP avaliados neste trabalho tanto no sentido de reduzir a volatilização de N-NH₃, quanto na produtividade das plantas.

A forma de manejo do fertilizante também pode contribuir na volatilização de N-NH₃. Segundo Tasca et al. (2011), o estado físico (sólido e líquido) e a forma de aplicação do fertilizante (superficial e incorporado) influenciaram o efeito do incremento da temperatura no processo de volatilização de N-NH₃. Para a temperatura de 18 °C, as maiores perdas ocorreram quando a ureia foi aplicada na forma líquida, enquanto que para 35 °C, a aplicação de ureia sólida proporcionou maior volatilização. Além disso, eles

pontuaram que a aplicação incorporada dos fertilizantes possibilitou a redução da volatilização de N-NH₃. Li et al. (2018) investigaram os efeitos de métodos de aplicação para diferentes taxas de aplicação de ureia e observaram que as maiores perdas ocorreram sob os tratamentos de fertirrigação, seguido de difusão e bandejamento. Ribeiro et al. (2016) avaliaram a perda de N-NH₃ de diferentes fertilizantes nitrogenados, formas de manejo (aplicação superficial e incorporado ao solo) e observaram que o tratamento ureia combinado com material orgânico obteve maior volatilização acumulada de N-NH₃ e que o manejo incorporado reduziu as perdas em comparação à aplicação superficial. Castro et al. (2017) utilizaram a biomassa algal para o estabelecimento de biofilme na camada superficial do solo o que propiciou menores perdas via volatilização de N-NH₃, além de ter proporcionado o aumento do teor de matéria orgânica no solo e o teor de N assimilado pelas plantas não diferiu em relação a aplicação de fertilizante químico.

A utilização de biofertilizantes de microalgas tem sido uma alternativa de produção mais ambientalmente viável, permitindo a recuperação de nutrientes comumente perdidos, por exemplo, no tratamento convencional de águas residuárias. Dessa forma, os resultados do presente trabalho indicam que a combinação entre ureia e microalgas favoreceu o aumento do teor e conteúdo de N nas plantas. O potencial nutritivo das microalgas é amplamente estudado. Mulbry et al. (2005) encontraram 4,51 % de N e 1 % de P na biomassa de algas produzidas a partir de efluente de esterco leiteiro. Estes autores ainda demonstraram que o fornecimento de N e P para as plantas de pepino e milho foi igual tanto para aplicação de biomassa de microalgas quanto pelo uso de fertilizante sintético. O potencial nutritivo da BM pode ser influenciado pela variedade de espécies de microalgas cultivada (Khan et al., 2019). Esse potencial nutritivo está intimamente relacionado à forma química que o N fica disponível. Segundo Mulbry et al. (2005), apenas 5 % do N da biomassa fica disponível na forma mineralizada e assim, pode ser qualificado como fertilizante de liberação lenta.

Além disso, a adição de material orgânico vem sendo proposta como estratégia alternativa para melhorar o manejo do solo, uma vez que o uso de fertilizantes sintéticos pode comprometer negativamente a diversidade microbiana, além de causar acidificação e salinização do solo (Bonanomi et al., 2020). Dentre os benefícios, pode-se destacar a melhora na condutividade hidráulica, pH, C e N total, além da capacidade de troca catiônica (CTC) observados por Uzoma et al. (2011) ao investigaram o efeito da aplicação de bichar de esterco de vaca, em diferentes proporções. A aplicação de biomassa de microalgas no solo também é vantajosa, pois além de aumentar a CTC, ela também

favorece o estabelecimento de um biofilme de microalga que permitiu o aumento do teor de matéria orgânica no solo, conforme observado por Castro et al. (2017). Yu et al. (2020) observaram que a aplicação de diferentes materiais orgânicos à longo prazo, a aplicação de material orgânico aumentou o teor das frações de C e N, até proporcionarem o aumento da biomassa microbiana do solo. Bonanomi et al. (2020), avaliando os efeitos de quatro tipos de aditivos orgânicos (palha de alfafa, glicose, esterco de búfala, e biochar de madeira), concluíram que a aplicação a longo prazo (dois anos) melhorou a produtividade da cultura, a saúde das plantas, além de aumentar a qualidade da microbiota e das propriedades químicas do solo, quando comparado com a aplicação de fertilizantes sintéticos, seja este sozinho ou combinado com fumigação.

5.4.1. Perspectivas futuras

O tratamento de efluentes aliado à geração de produtos de valor agregado à base de microalgas possibilita o desenvolvimento da bioeconomia circular, por meio da recuperação de nutrientes, evitando o uso de compostos sintéticos para a produção dessa biomassa de microalgas (Korhonen et al., 2018) A biomassa de microalgas no contexto agrícola é capaz de estimular o crescimento e o desenvolvimento de diversas culturas, podendo ser considerada um fertilizante orgânico de liberação lenta por conter macro, micronutrientes e conter substâncias que promovem o crescimento das plantas (Coppens et al., 2016; Ronga et al., 2019; Stirk et al., 2013), além de permitir o aumento do carbono orgânico e retenção de água no solo, e proporcionando a sustentabilidade da produção agrícola (Alvarez et al., 2021; Amenorfenyo et al., 2019; Renuka et al., 2018).

De acordo com Renuka et al. (2018), há muito progresso no uso de biofertilizantes à base de microalgas em escala comercial. Já estão no mercado produtos à base de microalgas cultivadas em ambientes artificiais que possibilitam o aumento da produtividade das plantas e da fertilidade do solo (Amenorfenyo et al., 2019; Renuka et al., 2018). O uso de água residuária é uma estratégia para reduzir os custos do cultivo de microalgas, tornando o biofertilizante algal economicamente competitivo.

A reprodutibilidade do processo e possível cenário de aumento de escala devem considerar as influências causadas pelas características do efluente e pelas variáveis ambientais locais envolvidas, principalmente durante as etapas de cultivo da biomassa e aplicação de fertilizantes no solo. Essas variáveis influenciam a diversidade e a produtividade das microalgas e envolvem fatores abióticos como intensidade de luz,

temperatura, clima, pH, concentração de nutrientes; fatores bióticos, como a presença de microrganismos (espécies de bactérias, microalgas e vírus); além de condições operacionais como tempo de espera hidráulica, taxa de mistura e colheita de biomassa (Gonçalves et al., 2017).

Ainda em relação à aplicabilidade em larga escala, devem ser considerados os efeitos escalonados da toxicidade do solo ocasionados pela aplicação do fertilizante proposto, embora não tenha sido o foco deste estudo. Pensando na possibilidade de escalonamento, a importância dessas análises deve ser enfatizada devido à presença de metais pesados e patógenos nas águas residuárias, principalmente devido à capacidade de biorremediação das microalgas (Hussain et al., 2021 ; Leong e Chang, 2020) As principais necessidades de pesquisa que limitam o uso de biomassa de microalgas no contexto agrícola referem-se principalmente à produção de microalgas em grande escala e à minimização de custos e impactos ambientais (Gonçalves et al., 2017) Esses aspectos de toxicidade e outros impactos ambientais potenciais da produção em larga escala podem ser avaliados por meio da análise do ciclo de vida (ACV) realizada em diversos estudos, conforme abordado por Arashiro et al. (2018) e (Castro et al., 2020a; Castro et al., 2020b).

5.5.Conclusão

Os resultados apresentados nesta pesquisa oferecem importantes informações para o desenvolvimento de tecnologias que promovam a viabilidade ambiental da produção agrícola. O FOP produzido, composto pela combinação de BM e fertilizante sintético em diferentes proporções, não apresentou diferença em relação ao tratamento UR, no que diz respeito a volatilização acumulada de N-NH₃. O tratamento com maior volatilização acumulada de N-NH₃ foi MBU40. As maiores taxas de recuperação de N absorvido pelas plantas foram alcançadas no tratamento MBU15 e MBU30, 54,23 % e 53,18 %, respectivamente. A maior taxa de recuperação pode ser alcançada na proporção 24,55 % de MB.

Quando a proporção de BM é 25 %, não há incremento de N absorvido pelas plantas, ao mesmo tempo em que a volatilização de N-NH₃ cresce com o aumento de BM. A aplicação do FOP desenvolvido promoveu a absorção de nutrientes, principalmente N, mas é necessário o aprimoramento de algumas etapas, como na colheita de BM, para produção de um biofertilizante neutro e eficiente. Analisar a viabilidade ambiental do fertilizante quanto aos impactos ambientais gerados também é importante para

dimensionar-se o potencial em redução de impactos. Assim, sugere-se uma avaliação do ciclo de vida do FOP desenvolvido neste trabalho e compará-lo com o fertilizante sintético, contabilizando todas as entradas e saídas de insumos durante a etapa de produção até a sua aplicação no solo.

Referências

- Almeida, B.G. de, Donagemma, G.K., Ruiz, H.A., Braidá, J.A., Viana, J.H.M., Reichert, J.M.M., Oliveira, L.B., Ceddia, M.B., Wadt, P.S., Fernandes, R.B.A., Passos, R.R., Dechen, S.C.F., Klein, V.A., Teixeira, W.G., 2012. Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil. EMBPARA 1–11.
- Alvarez, A.L., Weyers, S.L., Goemann, H.M., Peyton, B.M., Gardner, R.D., 2021. Microalgae , soil and plants : A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Res.* 54, 102200.
- Amenorfenyo, D.K., Huang, X., Zhang, Y., Zeng, Q., Zhang, N., Ren, J., Huang, Q., 2019. Microalgae brewery wastewater treatment: Potentials, benefits and the challenges. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16.
- APHA. American Public Health Association 2012. Standard Methods for examination of water and wastewater. Washington: American Water Work Association, Water Environmental Federation. 2012.
- Arashiro, L.T., Montero, N., Ferrer, I., Acién, F.G., Gómez, C., Garfí, M., 2018. Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Sci. Total Environ.* 622–623, 1118–1130.
- Araújo, S., Marsola, T., Miyazawa, M., Henrique, L., Soares, D.B., 2009. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 44, 769–776.
- Arbib, Z., Godos, I. De, Ruiz, J., Perales, J.A., 2017. Optimization of pilot high rate algal ponds for simultaneous nutrient removal and lipids production. *Sci. Total Environ.* 589, 66–72.
- Assis, L.R. de, Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Silva, T.A., Teixeira, J.S., 2020. Innovative hybrid system for wastewater treatment: High-rate algal ponds for effluent treatment and biofilm reactor for biomass production and harvesting. *J. Environ. Manage.* 274, 111183.
- Bonanomi, G., De Filippis, F., Zotti, M., Idbella, M., Cesarano, G., Al-Rowaily, S., Abd-

- ElGawad, A., 2020. Repeated applications of organic amendments promote beneficial microbiota, improve soil fertility and increase crop yield. *Appl. Soil Ecol.* 156, 103714.
- Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Cecon, P.R., Assis, I.R. de, Ribeiro, V.J., 2017. Microalgae biofilm in soil: Greenhouse gas emissions , ammonia volatilization and plant growth. *Sci. Total Environ.* 574, 1640–1648.
- Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Mattiello, E.M., Ribeiro, V.J., Assemany, P.P., 2020. Algal biomass from wastewater: soil phosphorus bioavailability and plants productivity. *Sci. Total Environ.* 711, 135088.
- Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Ferreira, J., Assemany, P.P., Ribeiro, V.J., 2020. Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. *Sci. Total Environ.* 724.
- Coppens, J., Grunert, O., Van Den Hende, S., Vanhoutte, I., Boon, N., Haesaert, G., De Gelder, L., 2016. 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.
- Craggs, R., Park, J., Heubeck, S., Sutherland, D., 2014. High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment , nutrient recovery and energy production. *New Zeal. J. Bot.* 52, 60–73.
- Embrapa Informação Tecnológica, 2009. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, 2a ed. Brasília.
- Ferraz-Almeida, R., Sanches, B.C., 2012. Fertilizantes nitrogenados com liberação lenta e estabilizada na agricultura. *Rev. Verde Agroecol. e Desenvol. Sustentável* 7, 31–35.
- Ferreira, J., de Assis, L.R., Oliveira, A.P. de S., Castro, J. de S., Calijuri, M.L., 2020. Innovative microalgae biomass harvesting methods: Technical feasibility and life cycle analysis. *Sci. Total Environ.* 746, 140939.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018. FAOSTAT - Fertilizers by Nutrient: Nitrogen N (total).
- García, D., Posadas, E., Grajeda, C., Blanco, S., Martínez-páramo, S., Acién, G., García-encina, P., Bolado, S., Muñoz, R., 2017. Comparative evaluation of piggery wastewater treatment in algal-bacterial photobioreactors under indoor and outdoor conditions. *Bioresour. Technol.* 245, 483–490.
- Godos, I. De, Blanco, S., García-encina, P.A., Becares, E., Muñoz, R., 2009. Long-term operation of high rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at

- high loading rates. *Bioresour. Technol.* 100, 4332–4339.
- Gonçalves, A.L., Pires, J.C.M., Simões, M., 2017. Review article A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Res.* 24, 403–415.
- Gregorich, E., Janzen, H.H., Helgason, B., Ellert, B., 2015. Chapter Two - Nitrogenous Gas Emissions from Soils and Greenhouse Gas Effects, in: *Advances in Agronomy*. pp. 39–74.
- Hussain, F., Shah, S.Z., Ahmad, H., Abubshait, S.A., Abubshait, H.A., Laref, A., Manikandan, A., Kusuma, H.S., Iqbal, M., 2021. Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 137, 110603.
- Hyams, 1997. D.G. CurveExpert 1.3: a comprehensive curve fitting system for Windows.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2017. Série histórica de dados de 1998 a 2017 [WWW Document]. URL <http://www.inmet.gov.br/portal/> (accessed 9.15.19).
- Kang, D., Kim, K., Jang, Y., Moon, H., Ju, D., Kwon, G., Jahng, D., 2018. International Biodeterioration & Biodegradation Enhancement of wastewater treatment efficiency through modulation of aeration and blue light on wastewater-borne algal-bacterial consortia. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 135, 9–18.
- Khan, S.A., Sharma, G.K., Malla, F.A., Kumar, A., 2019. Microalgae based biofertilizers : A biore fi nery approach to phycoremediate wastewater and harvest biodiesel and manure. *J. Clean. Prod.* 211, 1412–1419.
- Kitonyo, O.M., Sadras, V.O., Zhou, Y., Denton, M.D., 2018. Nitrogen fertilization modi fi es maize yield response to tillage and stubble in a sub-humid tropical environment. *F. Crop. Res.* 223, 113–124.
- Koefender, E., Padilha, M.T.S., Mello, D.F.M. de, Lumina, G., 2013. Enriquecimento da cana-de-açúcar com fontes de nitrogênio em agroecossistemas do norte e noroeste do Paraná Enrichment of sugar cane with sources of nitrogen in the north and northwest Paraná. *60 Rev. Cad. Agroecol.* 8, 59–73.
- Komarek, J., Fott, B., 1983. Chlorococcales, in: *Das Phytoplankton Im Susswasser Chlorophyceae (Grunanlagen) Ordnung*. p. 1041.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J., 2018. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecol. Econ.* 143, 37–46.
- Leong, Y.K., Chang, J.S., 2020. Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. *Bioresour. Technol.* 303, 122886.
- Li, M., Wang, Y., Adeli, A., Yan, H., 2018. Effects of application methods and urea rates

- on ammonia volatilization, yields and fine root biomass of alfalfa. *F. Crop. Res.* 218, 115–125.
- Mandal, S., Donner, E., Smith, E., Sarkar, B., Lombi, E., 2019. Biochar with near-neutral pH reduces ammonia volatilization and improves plant growth in a soil-plant system: A closed chamber experiment. *Sci. Total Environ.* 697, 134114.
- Matsushima, M., Lim, S.S., Kwak, J.H., Park, H.J., Lee, S. Il, Lee, D.S., Choi, W.J., 2009. Interactive effects of synthetic nitrogen fertilizer and composted manure on ammonia volatilization from soils. *Plant Soil* 325, 187–196.
- Ministério da Economia, 2019. Exportação e Importação Geral [WWW Document]. Comexstat. URL <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral> (accessed 11.1.19).
- Mulbry, W., Westhead, E.K., Pizarro, C., Sikora, L., 2005. Recycling of manure nutrients: use of algal biomass from dairy manure treatment as a slow release fertilizer. *Bioresour. Technol.* 96, 451–458.
- Nelson, D.W.; Sommers, L.E. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties (Second Edition), ASA and SSSA, Madison (1983), pp. 539-579
- Novais, R.F. de, V.; V.H.A., Barros, N.F. De, Fontes, R.L., Cantarutti, R.B., Neves, J.C.L., 2007. Fertilidade do solo, 1º. ed. Viçosa.
- Novais, R.F., Neves, J.C.L., Barros, N.F., 1991. Ensaio em ambiente controlado, in: Oliveira, A.J., Garrido, W.E., Araújo, J.D., Lourenço, S. (Eds.), Métodos de Pesquisa Em Fertilidade Do Solo. EMBRAPA-SAE, Brasília, pp. 189–254.
- Park, J.B.K., Craggs, R.J., Shilton, A.N., 2011. Bioresource Technology Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour. Technol.* 102, 35–42.
- Parra, O.A., Gonzalez, M., Dillarossa, V., Rivera, P., Orellana, M., 1982. Chlorophyceae Parte I Volvocales, Tetrasporales, Chlorococcales y Ulothricales, in: Manual Taxonomico Del Fitoplâncton de Águas Continentales.
- Renuka, N., Guldhe, A., Prasanna, R., Singh, P., Bux, F., 2018. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. *Biotechnol. Adv.* 36, 1255–1273.
- Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Alvarez V., V.H., 1999. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5a Aproximação.
- Ribeiro, V.J., Andrade, F.V., de Souza, C.H.E., Mendonça, E.S., 2016. Volatilization of ammonia in stabilized slow-release nitrogen fertilizer under controlled conditions.

- Aust. J. Crop Sci. 10, 793–798.
- Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E., Tava, A., 2019. Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy* 9, 1–22.
- Singh, J.S., Kumar, A., Singh, M., 2019. Cyanobacteria : A sustainable and commercial bio-resource in production of bio-fertilizer and bio-fuel from waste waters. *Environ. Sustain. Indic.* 3–4, 100008.
- Souza, M.H.B. de, Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Castro, J.D.S., Oliveira, A.C.M. de, 2019. Soil application of microalgae for nitrogen recovery : A life-cycle approach. *J. Clean. Prod.* 211, 342–349.
- Stirk, W.A., Ördög, V., Novák, O., Rolčák, J., Strnad, M., Bálint, P., van Staden, J., 2013. Auxin and cytokinin relationships in 24 microalgal strains¹. *J. Phycol.* 49, 459–467.
- Subedi, P., Shrestha, J., 2015. Improving soil fertility through Azolla application in low land rice: A review. *Azarian J. Agric.* 2, 35–39.
- Sun, H., Lu, H., Chu, L., Shao, H., Shi, W., 2017. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH₃ volatilization in a coastal saline soil. *Sci. Total Environ.* 575, 820–825.
- Tasca, F.A., Ernani, P.R., Rogeri, D.A., Gatiboni, L.C., Cassol, P.C., 2011. Volatilização De Amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 35, 493–509.
- Tedesco, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C.A., BOHNEN, H., VOLKWEISS, S.J., 1995. Análise de solo, plantas e outros materiais, 2nd ed. Departamento de Solos: UFRGS, Porto Alegre.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Teixeira, W.G., 2017. Manual de métodos de análise de solo, 3^o. ed, Embrapa. Embrapa, Brasília.
- Utermöhl, H., 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton - Methodik. Stuttgart Schweizerbart.
- Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., Nishihara, E., 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use Manag.* 27, 205–212.
- Wetzel, R.G., Likens, G. E., 1991. *Limnological Analysis*.
- Yang, G., Ji, H., Sheng, J., Zhang, Y., Feng, Y., Guo, Z., Chen, L., 2020. Combining Azolla and urease inhibitor to reduce ammonia volatilization and increase nitrogen use efficiency and grain yield of rice. *Sci. Total Environ.* 743, 140799.
- Yu, Q., Hu, X., Ma, J., Ye, J., Sun, W., Wang, Q., Lin, H., 2020. Effects of long-term

organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields. *Soil Tillage Res.* 196, 104483.

Zhang, H., Zhang, Y., Yan, C., Liu, E., Chen, B., 2016. Soil nitrogen and its fractions between long-term conventional and no-tillage systems with straw retention in dryland farming in northern China. *Geoderma* 269, 138–144.

Zhu, L., 2015. Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry : An innovative framework. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41, 1376–1384.

6. ARTIGO 2: PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE ORGANOMINERAL A BASE DE MICROALGAS: UMA ABORDAGEM DO CICLO DE VIDA

Resumo

Promover a recuperação e valorização dos recursos do saneamento é uma das alternativas que devem ser implementadas para mitigar a geração de impactos associados às atividades humanas. O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade ambiental de fertilizante organomineral composto por ureia e biomassa de microalgas (MB) cultivada em águas residuárias como uma alternativa ao fertilizante químico. Para tanto, foi realizada uma avaliação de ciclo de vida (ACV) onde foram consideradas as etapas de cultivo, colheita, secagem da MB, além da produção de pastilhas e aplicação no solo, como fertilizante de N, para o cultivo de plantas de milho (*Zea mays* L.). A ACV foi realizada no software SimaPro[®] utilizando dados primários obtidos durante o estudo descrito no primeiro artigo e dados secundários obtidos em literatura. Além disso, realizou-se a simulação de Monte Carlo para avaliar a incerteza nas várias entradas de dados. A unidade funcional considerada na ACV foi 1 kg de planta de milho cultivada durante 30 dias. Os resultados indicam que, para todas as categorias avaliadas, o uso de fertilizante constituído por biomassa de microalgas favoreceu a redução de impactos negativos em relação ao fertilizante químico, com exceção da categoria Consumo de água onde observou-se incremento dos impactos evitados. Porém, o aumento da porcentagem de biomassa no produto final não favoreceu a mitigação dos impactos em decorrência dos processos e insumos utilizadas, principalmente, durante as etapas de cultivo e colheita, nos cenários C4 (40 % de BM) e C5 (50% de BM). Em relação à análise de incerteza, foram observadas maiores variações na categoria de consumo de água (CV = 12,67 %) e eutrofização de água (CV = 12,36 %). Por fim, avaliou-se um cenário otimizado onde foi considerado, durante a colheita de biomassa, o processo de sedimentação gravitacional sem a adição de coagulante químico. A estratégia adotada favoreceu a mitigação dos impactos ambientais, dando maior competitividade ao fertilizante proposto pelo estudo em comparação com o fertilizante químico.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida; Biomassa de Microalgas; Águas Residuárias; Recuperação de Nutrientes; Biofertilizante.

6.1. Introdução

O crescimento exponencial da população, intensificação da urbanização e aumento dos padrões de consumo podem desencadear diversos problemas ambientais, como a poluição de corpos d'água, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e escassez de recursos minerais. Para amenizar os efeitos causados pelas atividades humanas, é necessária uma mudança de paradigma de maneira a promover a recuperação e valorização dos recursos (Arashiro et al., 2018; Choudhary et al., 2016; Mendonça et al., 2021). Diversos estudos sugerem a recuperação de nutrientes por meio do tratamento de águas residuárias e produção de microalgas como alternativa promissora e ambientalmente viável (Collotta et al., 2018; Herrera et al., 2020; Liu et al., 2021; Soares et al., 2019).

A biomassa algal produzida em lagoas de alta taxa (LATs) é rica em nitrogênio (N) e fósforo (P) e pode ser explorada como biofertilizante permitindo, portanto, a valorização estratégica dos nutrientes e o desenvolvimento sustentável do ambiente agrícola (Castro et al., 2020b; Das et al., 2019; Nayak et al., 2019; Silambarasan et al., 2021). Comparada com o fertilizante químico, a biomassa de microalgas pode fornecer uma concentração de cálcio 3 vezes maior e de ferro 2 vezes maior para as plantações, além de fornecer zinco e manganês que são micronutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas (Wuang et al., 2016). Os poucos estudos que avaliaram o potencial do uso de microalgas, cultivada em águas residuárias, como biofertilizante e bioestimulante obtiveram resultados positivos na taxa de crescimento de plantas além da substituição bem-sucedida de fertilizantes sintéticos (Das et al., 2019; Renuka et al., 2016; Silva et al., 2019; Suleiman et al., 2020).

Na maioria das vezes, a utilização de fertilizantes sintéticos implica em perdas de N via lixiviação de nitrato (NO_3^-), emissão de óxido nitroso (N_2O) e volatilização da amônia (NH_3) (Castro et al., 2017; Khan et al., 2019). Como consequência, os principais impactos causados pelo seu uso são a eutrofização de corpos d'água e influência indireta no aumento dos gases de efeito estufa, devido as emissões de NO_2 e NO (Gregorich et al., 2015). Diversos trabalhos investigam tecnologias para aumentar a eficiência dos fertilizantes nitrogenados para minimizar as perdas de N, seja pelo tipo de manejo ou pela utilização de fertilizantes de liberação lenta, ou pela adoção de fontes alternativas de fertilizantes (Cao et al., 2019; Ferraz-Almeida and Sanches, 2012; Kitonyo et al., 2018; Yu et al., 2020; Zhang et al., 2016).

Assim, para garantir a viabilidade ambiental tanto da produção quanto da aplicação de biofertilizantes derivado de microalgas é necessário avaliar todo o processo produtivo, por meio de avaliação de ciclo de vida (ACV). A ACV é um instrumento de avaliação dos aspectos ambientais e potenciais impactos associados a um produto, processo ou serviço, que computa todas as entradas e saídas do sistema produtivo, analisando desde a extração e preparação da matéria-prima, processamento, manufatura, transporte e distribuição, até o uso e disposição final (PRé, 2013a). A análise se constitui em uma técnica de gerenciamento e desenvolvimento ambiental e é regulamentada por normas específicas (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b). Seu uso é recomendado, pois permite a padronização dos estudos e comparação dos resultados.

Esta ferramenta analisa os impactos ambientais gerados na cadeia produtiva de diversos serviços e produtos, sendo também aplicada no contexto da produção de microalgas. Vários estudos concentraram seus esforços na avaliação de impacto ambiental dos produtos baseados em microalgas e a viabilidade ambiental do sistema, seja na produção de biodiesel (Bussa and Zollfrank, 2020; Dasan et al., 2019; Hossain et al., 2019) e produção de biogás (Sun et al., 2019; Xiao et al., 2019) ou na produção de biofertilizantes (Arashiro et al., 2018; Castro et al., 2020a; Souza et al., 2019).

Dentro do que foi exposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade ambiental da produção de um fertilizante organomineral pastilhado e posterior aplicação como biofertilizante para a produção de plantas. O fertilizante proposto foi composto pela combinação de ureia e BM cultivadas em águas residuárias conforme descrito por Pereira et al. (2021). A viabilidade ambiental foi determinada por meio de ACV, por meio do software SimaPro[®], utilizando dados primários e dados secundários obtidos em literatura.

6.2. Materiais e Métodos

A metodologia experimental incluiu as etapas de cultivo, colheita e secagem da biomassa seguido da produção do fertilizante e aplicação no solo como fonte de N. Dessa forma, o estudo foi dividido em três etapas: a primeira etapa envolveu a realização do experimento em escala piloto, cujo resultados são foram obtidos de Pereira et al. (2021); a segunda etapa envolveu a avaliação de ciclo de vida dos resultados obtidos na primeira fase a fim de identificar os efeitos do incremento de biomassa de microalgas no produto

final na geração de impactos e; por fim, na terceira etapa propôs-se um cenário otimizado da produção do fertilizante de microalgas.

6.2.1. Avaliação do ciclo de vida

A ACV foi realizada utilizando o software SimaPro[®] (PRè, 2013b) e foi realizada de acordo com as normas internacionais (International Organization for Standardization - ISO, 2006a, 2006b) que constitui-se de quatro etapas. Na primeira etapa, foram definidos os objetivos do estudo e unidade funcional do sistema analisado, além de determinar as fronteiras deste sistema e esclarecer as suposições e limitações que serão adotadas. Em seguida, foi realizada a análise de inventário, que consiste em fazer os levantamentos de todas as entradas, saídas e produtos evitados de cada fase do processo. Na terceira etapa, realizou-se a avaliação dos impactos ambientais gerados por determinado processo. E por último, foram interpretados todos os resultados gerados por cada etapa do processo.

Previamente, analisaram-se as respostas da aplicação do biofertilizante, composto por ureia e biomassa de microalgas, na produtividade de planas de milho e volatilização de amônia. A dose aplicada foi igual para todos os tratamentos (100 mg dm⁻³ de N) em um solo com pouco nitrogênio (Latosolo vermelho-amarelo) anteriormente caracterizado. Sendo assim, os dados utilizados na ACV foram obtidos a partir dos experimentos de produção de biofertilizante pastilhado composto por ureia e microalgas cultivadas em águas residuárias e quando necessário, completados por dados secundários. Mais detalhes sobre a metodologia experimental de produção do fertilizante organomineral composto de microalgas podem ser encontrados em Pereira et al. (2021).

6.2.1.1. Definição de objetivo, unidade funcional e escopo do estudo

Neste estudo, o objetivo da ACV foi quantificar os impactos ambientais da aplicação do biofertilizante na produção de plantas de milho, desde a extração da matéria-prima até a colheita da planta, comparando a aplicação de fertilizante convencional (100% de ureia) com um fertilizante organomineral pastilhado, composto pela combinação em diferentes proporções de biomassa de microalgas e ureia.

Assim, a unidade funcional adotada foi a produção de 1 kg de planta de milho, uma vez que cada biofertilizante produzido e o fertilizante convencional possuíam teores

diferentes de nitrogênio. Esta unidade funcional adotada foi limitada pelo período experimental do pelo estudo. A ACV foi realizada considerando desde o cultivo, colheita e secagem da biomassa de microalgas, produção do fertilizante pastilhado até a produção de plantas. Em uma abordagem “*cradle-to-field*”, foram considerados todos os processos e etapas desde a obtenção da matéria-prima até o uso do produto. Também foram considerados na análise os processos paralelos de produção de energia, NaOH, ureia e gradagem do solo.

A produção de insumos químicos e energia utilizada nos processos também foram considerados como *input*, por gerarem impactos que devem ser considerados. Todos os cenários avaliados foram modelados considerando que a energia utilizada foi obtida da matriz energética norte americana, disponibilizada pela base de dados Ecoinvent v.3 de 2008 a 2014. Foram desconsiderados os impactos provenientes da construção de instalações e equipamentos, inclusive aqueles que se referem a produção de biomassa, devido ao seu longo período de vida útil. Além disso, desconsiderou-se o uso de HCl após a colheita para neutralizar o pH da MB, pois em um processo produtivo esta etapa não aconteceria.

Durante a etapa de cultivo, consideraram-se os quantitativos referentes a água não consumida, nitrogênio total e fósforo total, uma vez que a produção de biomassa ocorreu tendo as águas residuárias como meio de cultivo e, portanto, evitou-se o uso destes para compor um meio sintético. Castro et al. (2020)a, Ferreira et al. (2020) e Souza et al. (2019) também utilizaram essa abordagem em seus estudos, pois a produção de biomassa de microalgas em águas residuárias evita os impactos causados pelos fertilizantes O uso de águas residuárias consistem em fonte de nutrientes de baixo custo (Couto et al., 2020) e que tecnologias, como a suplementação de CO₂, podem ser acopladas ao sistema para otimizar a produção de biomassa de microalgas (Sutherland et al., 2014).

A colheita da biomassa foi realizada por meio do uso de NaOH como coagulante. A eficiência da biomassa colhida durante esta etapa foi influenciada pelo uso deste coagulante, portanto, este insumo foi considerado na ACV. Além disso, considerou-se que nesta etapa, o processo de separação do sobrenadante e biomassa sedimentada ocorreu por meio de descarga de fundo e, portanto, sem o uso de energia.

Durante a etapa de secagem, utilizaram-se dados primários e considerou-se que nesta etapa não houve perdas de biomassa. Quanto ao insumo ureia utilizado na produção do fertilizante pastilhado, consideraram-se os dados disponibilizados na base de dados do

software utilizado. Porém, foram desconsiderados os impactos causados pelo transporte da ureia, do local de produção até o seu local de aplicação e uso.

Para a etapa de produção do grânulo de fertilizante organomineral, o estudo de referência utilizou uma forma de comprimidos de aço inoxidável, onde a mistura de biomassa de microalgas e ureia foi prensada manualmente, seguido de processo de secagem em estufa de circulação forçada a 35° C. Nos cenários avaliados foi considerado o processo de peletização descrito por Magelli et al. (2009), por ser um processo mecanizado que mais se assemelha ao que é observado em escala real.

Na etapa de produção de planta, também foram incorporados à análise os impactos provenientes do preparo do solo, considerando-se que esta foi realizada por meio de gradagem, dado também disponibilizado pela base de dados utilizada.

6.2.1.2. *Inventário de ciclo de vida*

A ACV foi modelada por meio de alguns dados primários, obtidos durante a operação do experimento e dados secundários obtidos na literatura (Tabela 6.1). Após definida a unidade funcional (1 kg de planta), realizaram-se todos os balanços de massa e energia para cada um dos seis cenários estudados. Os cenários 1, 2, 3, 4, 5 são cenários que consideram o uso de fertilizante pastilhado, composto por diferentes proporções de biomassa de microalgas e ureia (Figura 6.1A), enquanto o cenário 6, considera o uso de fertilizante comercial, a ureia granulada (Figura 6.1B). Em todos os cenários avaliados, desconsideraram-se os *inputs* e *outputs* referentes à solução nutritiva aplicada nas parcelas experimentais e o consumo de água para a irrigação das plantas. Tais simplificações foram feitas, pois tanto a aplicação de solução nutritiva quanto a irrigação da cultura foram adotadas considerando as demandas para o cultivo de milho e não variaram entre os cenários. Dessa forma, foi possível avaliar os impactos decorrentes das demais etapas no processo produtivo.

Tabela 6.1. Dados primários e secundários utilizados na ACV.

Item	Val Unida or de	Observações	Origem dos dados
Nitrogênio Total	55, 10 mg L ⁻¹	Concentração na etapa de cultivo	Dados primários
Fósforo Total	10, 26 mg L ⁻¹	Concentração na etapa de cultivo	Dados primários
BM cultivada	183 ,00 mg L ⁻¹	Concentração na etapa de cultivo	Dados primários
BM colhida	55 L	55 L de BM produzidos em 1000 L de efluente	Dados primários
Tempo de operação	17 dias	-	Dados primários
Energia consumida durante o cultivo de biomassa	2,7 kW	Energia consumida por uma LAT com área igual a 1 hectare	Albarelli et al. (2018)
NaOH	1,5 51 kg	50% m / v, densidade = 1,515 kg / m ³	Dados primários
Ureia	* kg	46% de N	Dados primários
Secagem da biomassa	0,4 6 kWh	Volume de efluente = 1 m ³	Soares et al. (2019)
Energia consumida no processo de granulação de ureia	4,6 2 kWh	Energia para obtenção de 1 kg de grânulo	Farahani et al. (2017)
Produção de Pellet	0,1 122 kWh 3	Produção = 1 kg de pellet	Magelli et al. (2009)
Requisito de área para o cultivo	0,0 001 ha	Área necessária para produção de 1 kg de planta	Dado primário

* Este valor variou de acordo com cada cenário avaliado.

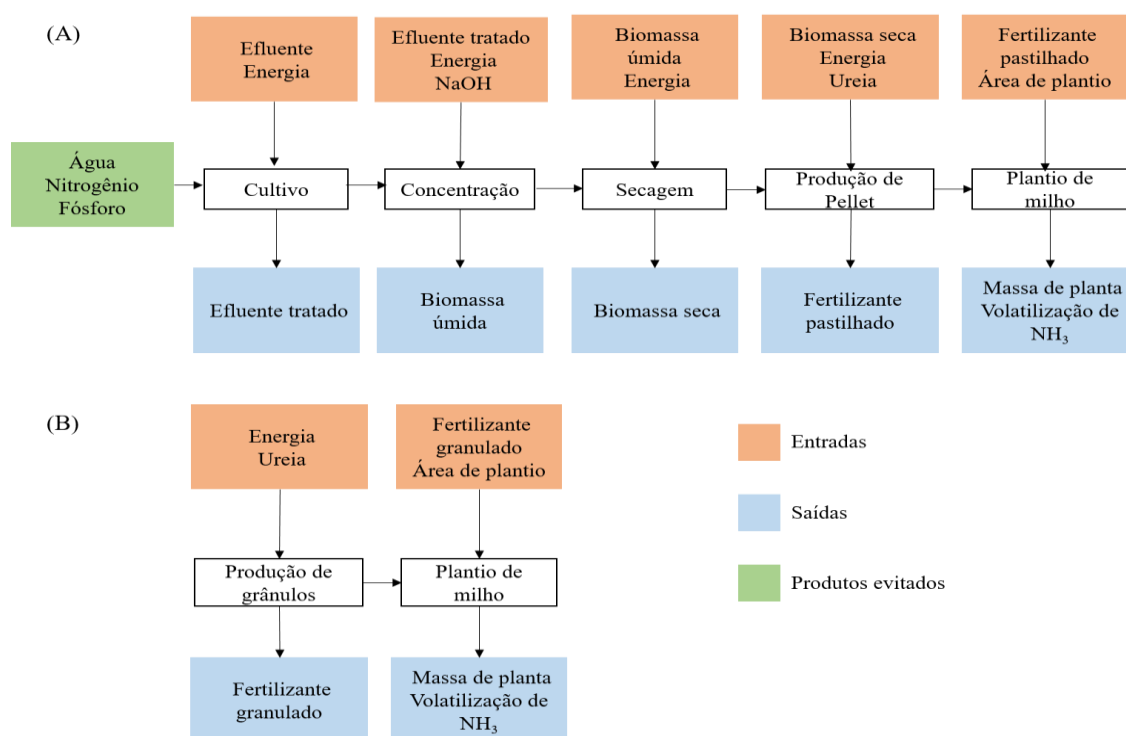


Figura 6.1. Fluxogramas de produção de fertilizante pastilhado (A) e ureia granulada (B).

6.2.1.3. Categorias de impacto e metodologia LCA

Os impactos do ciclo de vida da produção e utilização do fertilizante pastilhado foram quantificados e avaliados utilizando o software SimaPro 8.2.3.0 por meio da metodologia ReCiPe midpoint (H) que é mais representativa em escala global (Schade e Meier, 2019) com foco nas questões ambientais, tornando-o, portanto, o método mais qualificado para este estudo (PRé, 2013). Das 18 categorias de impacto ambiental disponibilizados no ReCiPe, o presente estudo focou em: mudanças climáticas, consumo de água, depleção fóssil, eutrofização marinha, eutrofização de água doce, acidificação terrestre, depleção de ozônio e formação de material particulado. Outros trabalhos também utilizaram essas categorias, seja envolvendo a produção de biomassa de microalgas ou a produção de fertilizantes (Arashiro et al., 2018; Castro et al., 2020a; Ferreira et al., 2020; Souza et al., 2019). Os resultados gerados foram discutidos de modo a identificar as etapas que mais contribuiriam na geração de impactos, além de propor estratégias de melhoria no processo. Foi utilizado o Ecoinvent – Allocation, Default

(Ecoinvent, 2014) com a base de dados ‘resto do mundo’ (RoW), uma vez que a matriz energética brasileira não é representativa em comparação com a matriz global.

6.2.2. Análise de incerteza

As várias entradas de dados podem conter algum nível de incerteza e quando se somam, são capazes de influenciar nos resultados obtidos na ACV (Herrera et al., 2020). Assim, durante a comparação dos impactos gerados por diferentes processos ou produtos é importante verificar se as diferenças entre esses são significativas ou não (PRé, 2013). No presente estudo, realizou-se a análise de Monte Carlo, assumindo uma distribuição uniforme e intervalo de confiança de 95%. Os valores experimentais, máximo e mínimo para cada cenário, foram utilizados para avaliar o desempenho ambiental do uso de microalgas na produção de fertilizante, em comparação com o fertilizante sintético. A análise foi executada no SimaPro[®] que permite a análise de todos os parâmetros com 1.000 simulações independentes.

6.2.3. Proposição de cenário otimizado

Após a modelagem e avaliação dos cenários, foram identificadas possíveis melhorias que podem ser adotadas no processo produtivo do fertilizante organomineral. Assim, neste tópico realizou-se a ACV alocacional, onde todas as propostas de melhorias ao sistema foram incorporadas às cadeias produtivas de cada fertilizante proposto (C7). Nesta perspectiva, considerou-se a realização da etapa de colheita de biomassa de microalgas sem a adição de NaOH, de forma que a separação da biomassa ocorra via sedimentação gravitacional por meio considerando 100 % de eficiência; e o melhor desempenho técnico obtido no primeiro artigo, o cenário 2 (15% de BM + ureia) que obteve maior taxa de recuperação de N (54,23%).

Após elaborado o cenário otimizado, utilizou-se os resultados obtidos nos cenários C2 e C6 para comparar os ganhos e perdas de impactos provocados pelas melhorias incorporadas ao sistema. Por fim, é importante ressaltar que os dados obtidos no estudo de referência sofreram influência do uso de NaOH, uma vez que provocaram o aumento do pH do solo e conseqüentemente aumentaram a volatilização de amônia. Portanto, neste último cenário não foi possível quantificar essa interferência nos dados finais utilizados na ACV sendo, portanto, uma limitação da análise.

6.3. Resultados

6.3.1. Inventário de ciclo de vida

Na Tabela 6.2 Figura 6.1, apresenta-se o inventário do ciclo de vida para cada cenário estudado, considerando a unidade funcional igual a 1 kg de massa de planta.

Tabela 6.2. Inventário do ciclo de vida dos biofertilizantes e granulação da ureia.

Etapa do processo do ciclo de vida		Descrição	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Cultivo	Entrada	Efluente industrial	m ³	0,01800	0,06663	0,15452	0,22736	0,29653	-
		Energia	kWh	0,00654	0,02422	0,05617	0,08265	0,10780	-
	Produtos evitados	Água	m ³	0,01800	0,06663	0,15452	0,22736	0,29653	-
		Nitrogênio	g de N	0,99169	3,67151	8,51410	12,52740	16,33883	-
		Fósforo	g de P ₂ O ₅	0,42312	1,56651	3,63268	5,34503	6,97124	-
Saídas	Efluente tratado	m ³	0,01800	0,06663	0,15452	0,22736	0,29653	-	
Colheita	Entrada	Coagulante (NaOH)	kg	0,02727	0,10095	0,23410	0,34445	0,44924	-
	Saídas	Efluente tratado	m ³	0,01800	0,06663	0,15452	0,22736	0,29653	-
		Biomassa úmida	kg	0,98990	3,66485	8,49865	12,50466	16,30918	-
Secagem	Entradas	Energia	kWh	0,00046	0,00169	0,00391	0,00575	0,00750	-
		Biomassa úmida	kg	0,98990	3,66485	8,49865	12,50466	16,30918	-
	Saídas	Biomassa seca	kg	0,00329	0,01219	0,02828	0,04161	0,05427	-
Produção do fertilizante	Entradas	Energia	kWh	0,00739	0,00912	0,01058	0,01167	0,01218	0,36269*
		Ureia	kg	0,06258	0,06910	0,06598	0,06241	0,05427	0,07837
		Biomassa seca	kg	0,00329	0,01219	0,02828	0,04161	0,05427	-
	Saídas	Biofertilizante	kg	0,06587	0,08129	0,09426	0,10402	0,10853	-
Plantio de milho	Entradas	Área de Plantio	ha	0,00013	0,00013	0,00014	0,00013	0,00013	0,00015
		Fertilizante	kg	0,06587	0,08129	0,09426	0,10402	0,10853	0,07837
	Saídas	NH ₃ volatilizada	kg	0,00198	0,00217	0,002252	0,002181124	0,002112598	0,002219818
		Produção de planta	kg	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000

*Energia gasta na produção de fertilizantes granulados, segundo Farahani et al. (2017)

Observou-se que o incremento do percentual de biomassa de microalga no fertilizante pastilhado favoreceu o consumo da energia total do sistema. As etapas que mais contribuíram para esse consumo foram as etapas de cultivo de biomassa e produção de pastilhas. O consumo de energia nesta etapa do processo (0,00654 a 0,10780 kwh) foi em consequência do longo período de operação das LATs (17 dias) e, portanto, das características do efluente estudado e produção em batelada adotada no estudo. Dessa forma, o consumo de energia na etapa de cultivo representou 45,46 % a 82,59 % do consumo total, conforme é apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Consumo de energia por etapa da produção, em porcentagem.

Etapa do processo	C1	C2	C3	C4	C5
Cultivo (%)	45,46	69,14	79,50	82,59	84,56
Secagem (%)	3,16	4,81	5,53	5,75	5,89
Produção de fertilizante (%)	51,37	26,04	14,97	11,66	9,55

A etapa de produção do fertilizante também foi responsável por grande parte das demandas por energia requeridas na produção do fertilizante pastilhado variando entre 0,00739 kwh no cenário 1, até 0,01218 kwh em C5. Porém, o consumo foi menor comparado ao processo de granulação da ureia, onde foi observado consumo de 0,36269 kwh. Dessa forma, tanto o consumo de energia durante a etapa de cultivo, quanto o consumo de NaOH, utilizado na etapa de colheita, influenciaram na geração de impactos ambientais, tendo em vista que os cenários apresentavam diferentes percentuais de biomassa de microalgas.

6.3.2. Comparação entre os cenários: impactos ambientais

A contribuição relativa por categoria de impacto observado em cada cenário é apresentada na Figura 6.2. Os valores obtidos expressam a importância relativa de cada categoria de impacto em um único valor, expresso em Eco-point, permitindo assim, a comparação entre as categorias e demais estudos. Apenas a categoria de consumo de água não foi apresentada, pois durante o processo de normalização dos dados esta categoria obteve valor igual a zero. As categorias de impacto acidificação terrestre, seguida da formação de material particulado, eutrofização de água doce e depleção fóssil tiveram as maiores contribuições.

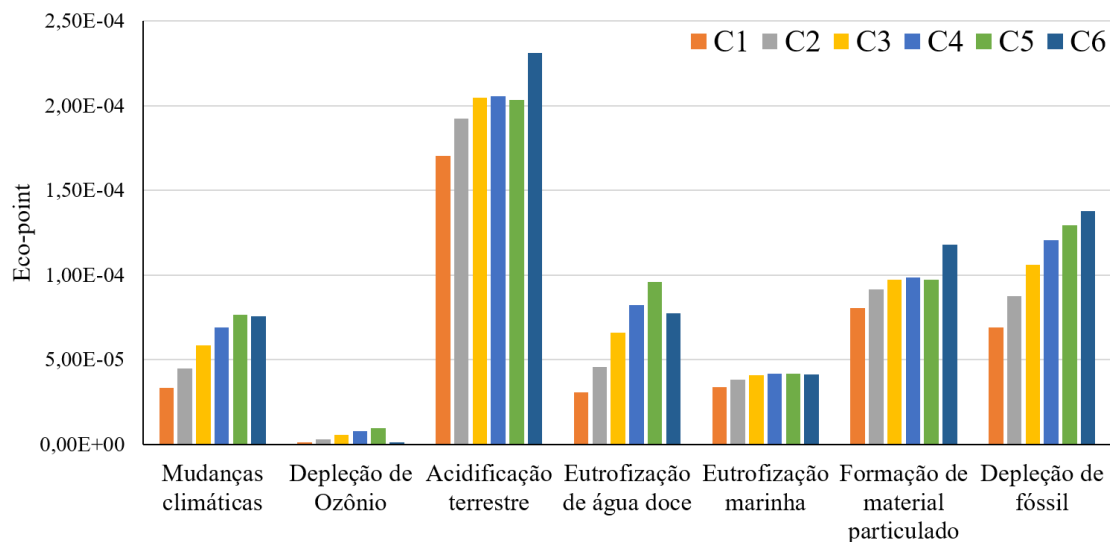


Figura 6.2. Contribuição relativa dos impactos ambientais dos cenários avaliados.

De maneira geral, foi possível observar que o aporte de biomassa de microalgas favoreceu a geração de impactos negativos, ou seja, o aumento da porcentagem de biomassa no produto final permitiu o aumento do impacto negativo. Com exceção da categoria depleção de ozônio, os biofertilizantes com 5, 15 e 30% de BM foram observados menos impactantes que a Ureia. Contudo, a contribuição relativa total, somando os valores obtidos nas categorias, foi: $C1 < C2 < C3 < C4 < C5 < C6$. O cenário C6 obteve maiores valores que os demais para as categorias acidificação terrestre, formação de material particulado e depleção fósfil, fato que pode ser comprovado pelo excessivo consumo de energia durante a obtenção de ureia granulada.

Os impactos ambientais potenciais associados a cada cenário estão apresentados na Figura 6.3, onde as barras negativas representam os impactos evitados nas respectivas categorias. Na Figura 6.4, são apresentados os impactos gerados em diferentes etapas do processo para cada cenário avaliado. De forma geral, à medida que o percentual de BM aumentou na composição do FOP, aumentaram-se os valores de impacto total nas categorias avaliadas, exceto na categoria consumo de água. Os resultados indicaram que o uso de NaOH, durante a etapa de colheita contribuiu diretamente na geração de impactos para todas as categorias analisadas e justificando, assim, o aumento de impactos a medida em que aumentou o percentual de BM.

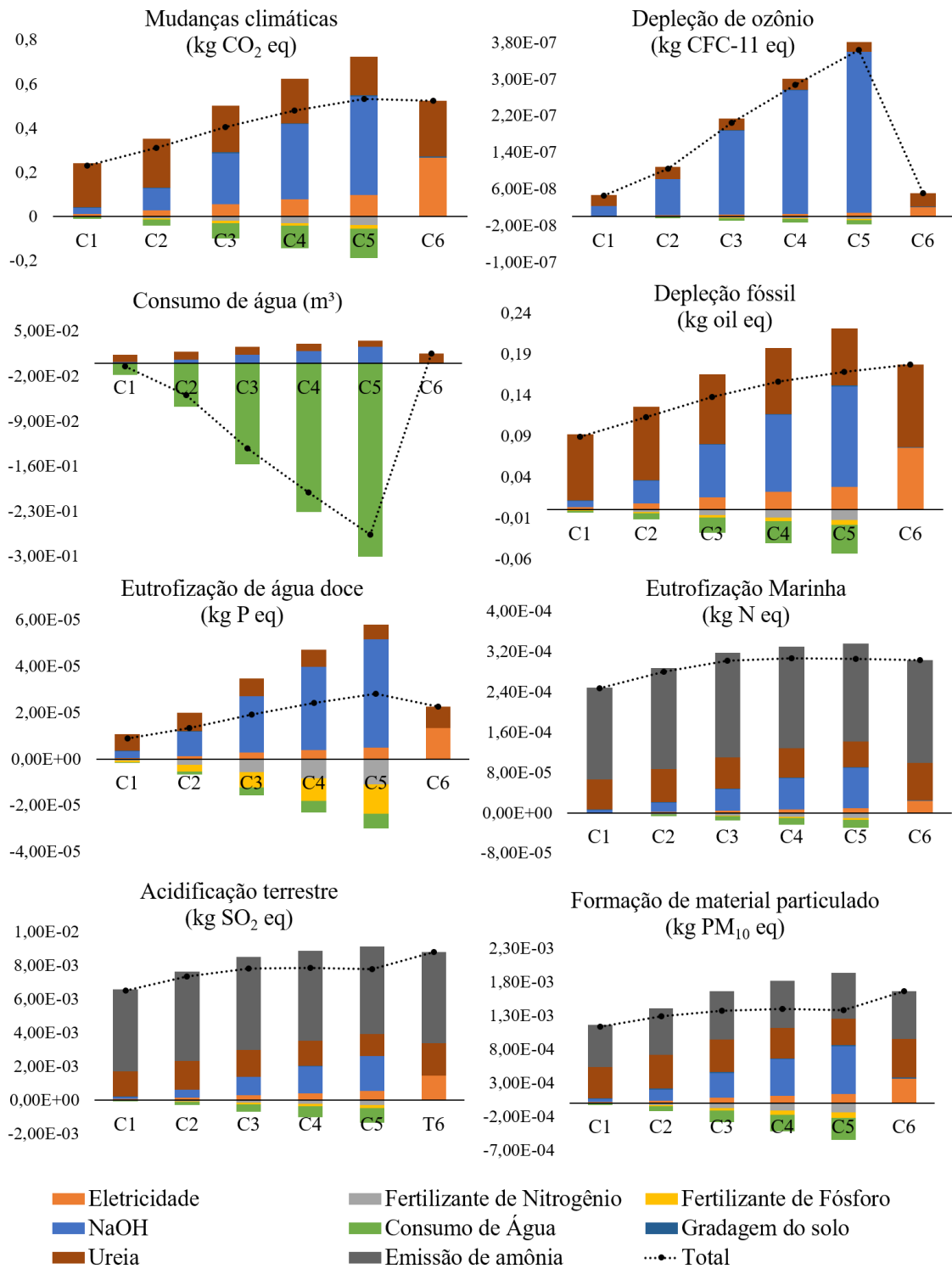


Figura 6.3. Potenciais impactos ambientais (total e por input).

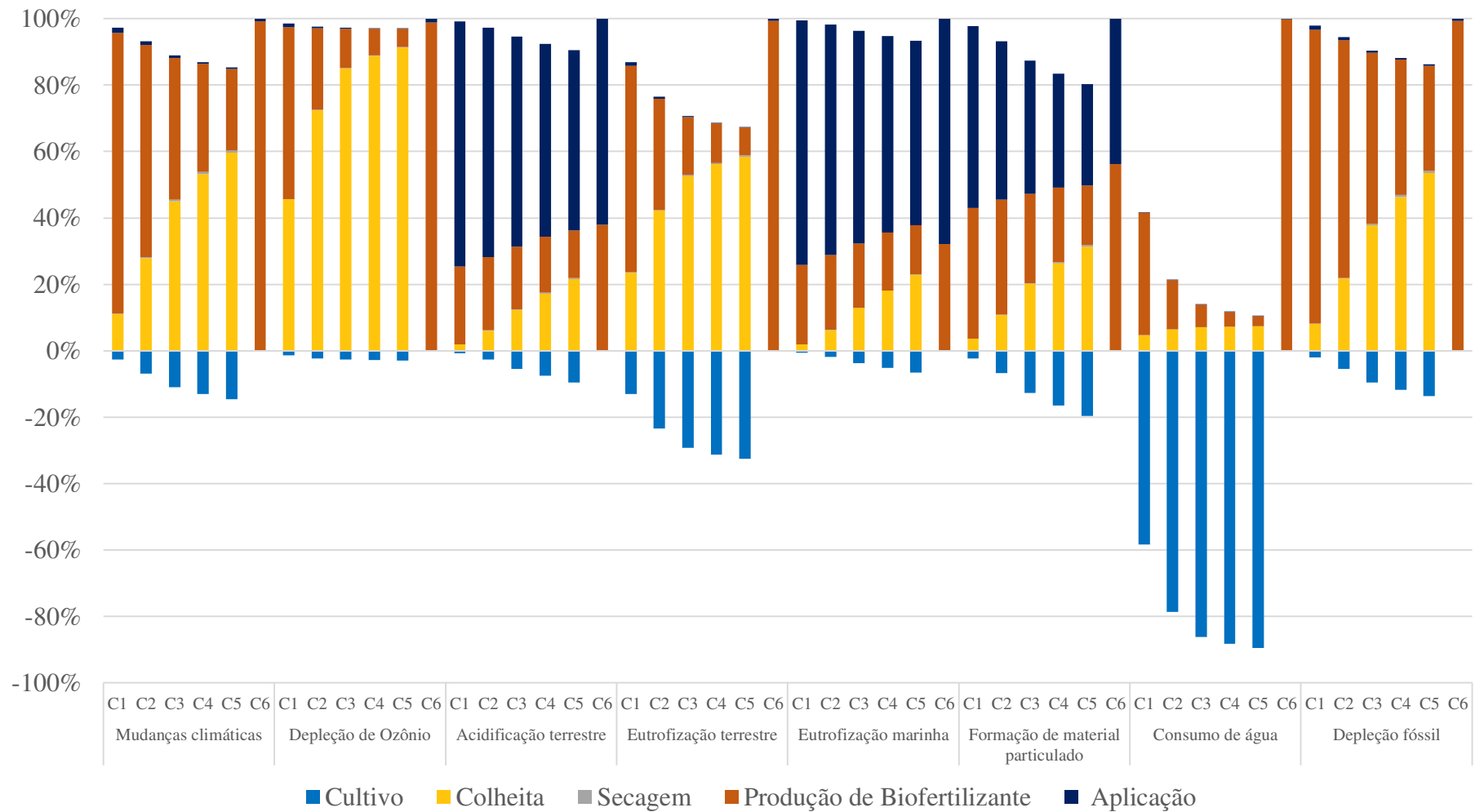


Figura 6.4. Impactos gerados em diferentes etapas do processo para a produção de 1kg de planta.

A categoria mudanças climáticas, expressa em kg CO₂ eq, representa a quantidade de pressão de emissão adicional ao longo de 100 anos devido a uma emissão de 1 kg de CO₂ (Herrera et al., 2020; Huijbregts et al., 2017). Para essa categoria, o impacto total foi maior no cenário C5 (0,53 kg CO₂eq), superando até o valor do cenário C6 (0,52 kg CO₂eq) e o principal fator que contribuiu para esse fato foi o uso de NaOH, sendo responsável por 84,22% da geração total de impacto. Segundo Wu et al. (2020), as emissões de GEE no subsistema de produção de fertilizantes químicos que incluem CO₂, CH₄ e N₂O emitidos na extração, transporte e fabricação, foram também expressos em termos de carbono equivalente. Assim, a ureia gerou impacto ambiental em todos os cenários observados, porém os impactos promovidos por esse insumo foram reduzidos ao combiná-lo com MB.

A categoria depleção de ozônio avalia os impactos devido as emissões de clorofluorcarbono (CFCs), além de outras substâncias destruidoras da camada de ozônio, sendo expressa em kg CFC-11. O potencial de destruição da camada de ozônio da produção de fertilizantes derivados de microalgas e ureia ocorreu, principalmente, nas etapas de colheita e produção de fertilizante devido ao uso de NaOH e ureia, respectivamente. A produção desses compostos químicos envolve a emissão de gases de efeito estufa, principalmente pela alta demanda por energia fóssil. Nesta categoria, apenas o cenário C1 obteve menor valor de impacto total em comparação ao cenário C6 e mais uma vez o input NaOH foi o que mais contribuiu na geração de impactos, sendo responsável por 96,94 % dos impactos gerados no cenário C5.

A acidificação terrestre é considerada um indicador de mudanças climáticas e os principais contaminantes são SO₂, NO_x, HCl e NH₃ (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). O impacto observado nesta categoria foi influenciado pelas etapas de produção de fertilizante, devido ao uso de ureia na composição do FOP e, na etapa de plantio, devido a emissão de NH₃. Porém, os produtos não utilizados (água, fertilizantes de nitrogênio e fósforo) durante a etapa de cultivo da BM influenciaram no valor total do impacto nesta categoria, permitindo que todos os cenários com percentuais de BM (C1 a C2) apresentassem menores valores de impacto total em relação ao cenário C6, sendo 26,19% e 16,80% a menos observados nos cenários C1 e C2, respectivamente. As emissões de NO_x estão relacionadas ao uso de eletricidade devido a queima de combustíveis, muito presente na matriz energética adotada. A eutrofização é um processo que causa alterações das características dos copos d'água devido ao aporte de nutrientes (Herrera et al., 2020). A categoria de eutrofização de corpos de água doce, expressa em kg P eq, o impacto foi

gerado pela produção de NaOH, insumo utilizado na etapa de colheita. Porém, o uso de águas residuárias favoreceu a redução do impacto total da categoria, reduzindo em 34,36 %, 40,45 % e 45,26 % do total observado em C3, C4 e C5. Já a categoria de eutrofização marinha, expressa em kg N eq, o impacto gerado foi, principalmente, pelas emissões de NH₃ observada em todos os tratamentos representando 73,97 % em C1; 71,42 % em C2; 68,70 % em C3; 65,60 % em C4; 63,64% em C5 e 67,45% em C6.

No que diz respeito a formação de material particulado, expresso em kg PM10 eq, as contribuições foram, principalmente, devidas as emissões de NH₃ e uso de ureia. Dessa forma, o incremento de BM no tratamento e redução de ureia favorecem a diminuição do impacto total da categoria. No cenário C5, por exemplo, observou-se uma redução de 23,93 % e 10,59% do impacto total, referente ao consumo de água e fertilizante de nitrogênio evitado. A categoria consumo de água, expresso em m³, todos os cenários com percentuais de BM obtiveram valores negativos de impacto em relação ao cenário C6, ou seja, valores de impacto evitado, indicando a viabilidade ambiental global da categoria. Esse fato ocorreu, principalmente, devido ao uso de águas residuárias durante o cultivo, que foi muito maior quando comparado ao consumo indireto de água durante os demais processos e etapas.

A depleção de fósforo observada pode ser explicada pelo consumo de eletricidade e utilização de ureia envolvidos principalmente durante as etapas de cultivo de biomassa e produção do fertilizante. A ureia representou 90,70 % e 42,00 % do total de impactos observados no cenário com menor e maior porcentagem de biomassa, C1 e C5 respectivamente. A produção deste insumo implicou no consumo indireto de energia, contribuindo ainda mais na geração de mais impactos. Portanto, as etapas do processo produtivo de fertilizante que mais contribuíram para a geração de impactos foram as etapas de colheita da biomassa, devido uso do NaOH como coagulante; produção do fertilizante, devido ao uso de ureia e aplicação no solo como fonte de N, devido as perdas de N via volatilização de amônia.

6.3.3. Incerteza nas emissões relacionadas as categorias de impacto

Os resultados da simulação de Monte Carlo estão representados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4. Resultados da simulação de Monte Carlo para as categorias de impacto afetadas

Cenários	Categorias de Impacto	Mudanças climáticas	Depleção de Ozônio	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Eutrofização marinha	Formação de material Particulado	Consumo de água	Depleção fóssil
	Unidade	kg CO ₂ eq	kg CFC-11 eq	kg SO ₂ eq	kg P eq	kg N eq	kg PM-10 eq	m ³	kg oil eq
C1	Média	0,23945347	4,71E-08	0,006774777	4,87E-05	5,08E-04	0,00117564	-0,004742301	9,22E-02
	CV (%)	8,14	6,46	9,83	6,68	6,40	8,06	23,59	8,44
C2	Média	0,30968035	1,04E-07	4,08E-05	9,43E-05	0,001064312	0,00127608	-0,049650102	0,11317022
	CV (%)	6,97	7,23	7,98	7,60	6,96	5,42	12,33	7,24
C3	Média	0,39412946	2,01E-07	0,00668361	0,000169505	0,001988415	0,001219656	-0,12891172	0,13421343
	CV (%)	4,28	4,82	10,05	5,29	5,03	7,66	6,33	4,23
C4	Média	0,48546272	2,94E-07	0,007942831	0,00024238	0,002936471	0,001414648	-0,2052	0,15874431
	CV (%)	5,13	5,83	5,19	6,53	5,85	4,77	6,86	4,80
C5	Média	0,55010466	3,77E-07	0,00721155	0,00030733	0,003737891	0,001322191	-0,27629409	0,17337188
	CV (%)	10,58	10,84	7,26	12,36	10,95	8,85	12,67	9,84
C6	Média	0,52404264	5,08E-08	0,008872986	0,000139693	0,000391281	0,001671303	0,015340234	0,17788108
	CV (%)	1,09	1,10	0,59	1,21	0,65	0,69	1,44	1,10

Os resultados da simulação de Monte Carlo para avaliar a incerteza dos fatores envolvidos na ACV mostraram as categorias que são mais afetadas. As menores incertezas foram observadas no cenário C6 devido a sua menor variação dos dados. A categoria de consumo de água e eutrofização marinha obtiveram os maiores coeficientes de variações nos cenários que utilizam biomassa de microalga, representando respectivamente 12,67 % e 12,36% e esse fato pode ser atribuído a variação dos dados de água evitada durante o cultivo de biomassa de microalgas.

6.3.4. Cenário otimizado

O cenário otimizado para a produção de fertilizantes composto por microalgas foi modelado considerando o melhor desempenho técnico (C2) e a etapa de concentração da biomassa sem o uso de NaOH. O resultado desta análise é apresentado na Figura 6.5.

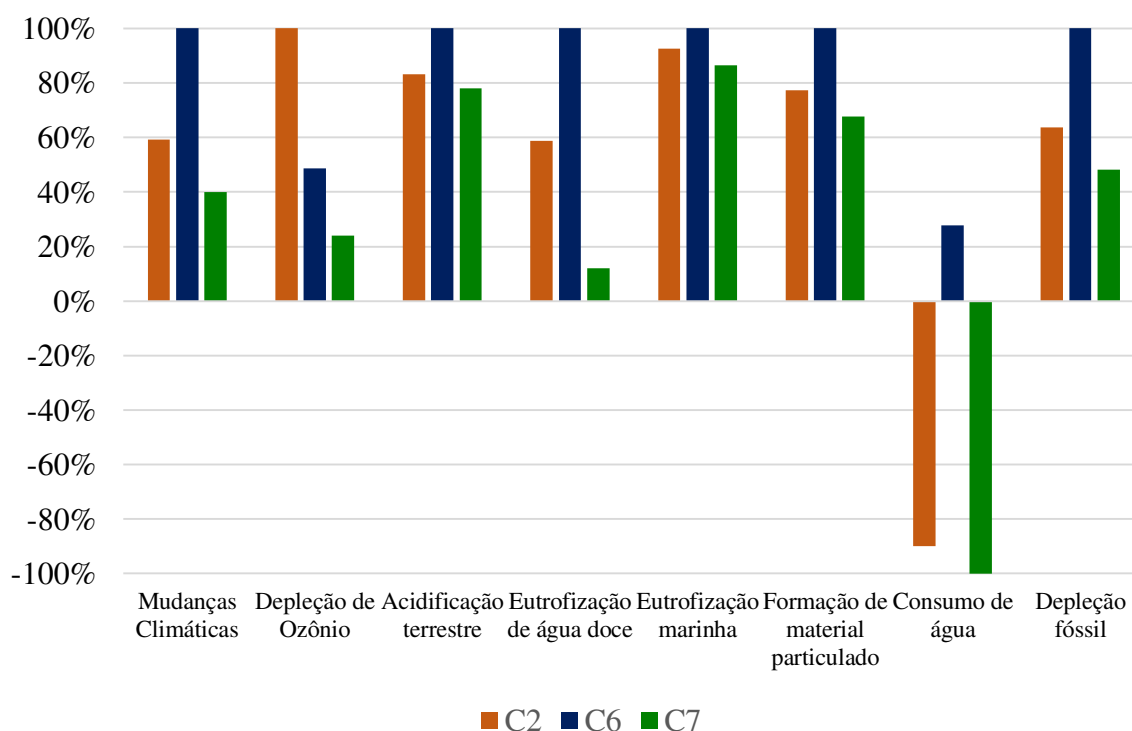


Figura 6.5. Comparação percentual dos impactos entre o melhor cenário técnico (C2), cenário de uso de fertilizante químico (C6) e cenário otimizado (C7).

A melhoria do sistema permitiu redução dos impactos observados na categoria de depleção de ozônio, que anteriormente (em C2) apresentava maior impacto. A adaptação proposta teve como principal resultado a redução de impacto nas categorias acidificação

terrestre (93,64 %), eutrofização marinha (93,53 %), formação de material particulado (87,57 %) e depleção fóssil (75,60 %) em comparação com o cenário C2.

6.4. Discussão

De forma geral, os resultados indicaram que o uso de fertilizante organomineral composto por microalgas gerou menos impactos em relação ao uso de fertilizante químico. O resultado condiz com o que foi observado por Jiang et al. (2021), onde todas as categorias avaliadas tiveram seus impactos mitigados pelo uso de reuso de recurso.

Os resultados obtidos mostraram que as categorias de depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas, formação de material particulado e depleção fóssil apresentaram maior contribuição relativa em decorrência do uso de eletricidade demandado durante a produção de ureia e NaOH e a categoria eutrofização de água doce é influenciada apenas pela produção de NaOH. A acidificação terrestre e eutrofização marinha estão relacionadas as emissões de NH_3 , enquanto o consumo de água está diretamente relacionado à água não utilizada devido ao uso de águas residuárias.

A recuperação de nutrientes observada, promovida pelo uso de águas residuárias, permitiu a redução dos impactos ambientais da cadeia produtiva do fertilizante organomineral. Os resultados obtidos neste estudo mostraram que para as categorias de acidificação terrestre e a formação de material particulado, a inclusão de biomassa de microalgas favoreceu a redução do impacto total devido ao uso de águas residuárias e produtos evitados durante a etapa de cultivo, resultado que corrobora os dados de Castro et al. (2020a).

Herrera et al. (2020), durante o cultivo de microalgas, observaram que o uso de nutrientes recuperados produziu maiores impactos do que o uso de fertilizantes para as categorias de acidificação terrestre e formação de material particulado. Estes maiores valores de impacto estão associados a presença de nitrogênio, na forma de amoníaco, que é volatilizada durante a etapa de cultivo de microalgas. As eutrofização e mudanças climáticas também são categorias influenciadas pelas emissões de amônia e óxido nitroso dos sistemas de manejo de dejetos (Cherubini et al., 2015).

Arashiro et al. (2018) avaliaram o potencial de impacto ambiental causado pela produção de biofertilizante de microalgas cultivadas derivado de águas residuárias cultivadas em LATs. Estes autores observaram 0,015 kg SO_2 eq e 0,001 kg P eq referente às categorias de impacto acidificação terrestre e formação de material particulado, e esses

valores foram menores em relação aos outros sistemas comparados (sistemas de lodos ativados e produção de biogás via microalgas cultivadas em LATs).

Estudos demonstraram que a biofertilização, composto por microalgas cultivadas em águas residuais, podem melhorar a estrutura e a fertilidade do solo, reduzir a erosão e aumentar a capacidade de retenção de água (Renuka et al., 2016; Silva et al., 2019). Porém, esses ganhos relatados em literatura não são contabilizados na ACV, apesar de permitirem a geração de impacto positivo (ou seja, um valor negativo na escala de geração de impactos). Além disso, é importante considerar as limitações do presente estudo, onde foram desconsideradas as perdas durante o cultivo de microalgas, ao contrário do que foi avaliado por Arashiro et al. (2018) e Herrera et al. (2020), como as perdas de N e P durante a colheita da biomassa e emissões de CO₂ e N₂O durante o cultivo da planta de milho, como observado por Castro et al. (2017).

Embora um esforço tenha sido realizado na elaboração da ACV, há ainda um grande potencial de melhoria na forma como as vias de impacto são modeladas, além das tecnologias que podem ser implementadas ao sistema.

Por exemplo, o uso de NaOH como coagulante, durante a etapa de colheita, influenciou nos valores totais de impacto em diversas categorias analisadas e, atualmente, já existem alternativas que podem reduzir os impactos desta etapa. Ferreira et al. (2020) avaliaram o desempenho técnico e ambiental de diferentes tecnologias de colheita de biomassa cultivadas em efluentes doméstico. Os autores observaram que o sistema híbrido (Reator de biofilme acoplado à LAT) mais sedimentação gravitacional e cenário de aplicação de tanino (coagulante) mais sedimentação gravitacional, apresentaram menor impacto ambiental em relação ao cenário que utilizou apenas a sedimentação gravitacional.

O consumo de energia também foi um obstáculo para o desenvolvimento de tecnologias alternativas para a obtenção de fertilizante orgânico. Essa barreira foi observada por Pradel e Aissani (2019) que concluíram que o fertilizante mineral obteve menores impactos ambientais do que o fertilizante à base de lodo de esgoto de estação de tratamento de águas residuárias. No presente estudo, esses impactos causados pelo consumo de energia podem ser minimizados readaptando o sistema e melhorando a sua produtividade. Collotta et al. (2018) avaliaram os benefícios ambientais decorrentes do uso de combinado de diferentes fontes de CO₂ e águas residuárias no cultivo de microalgas para a geração de biocombustíveis, tendo como unidade funcional 1 kg de *Chlorella vulgaris*. O cenário que produziu menor impacto ambiental foi aquele onde

utilizaram-se águas residuárias e injeção direta de gás de combustão, 0,306 kg CO₂ eq para cada kg de biomassa produzida.

Segundo Arashiro et al. (2018), as alternativas para melhorar o desempenho ambiental da tecnologia de LAT, para o tratamento de águas residuárias e recuperação dos nutrientes, devem estar focadas na redução das emissões de NH₃. Isso pode ser feito controlando o pH do meio de cultivo a partir da injeção de CO₂, permitindo que maiores concentrações de N sejam incorporadas pelas microalgas, ao invés de perdidas. Além disso, Arashiro et al. (2018) ressaltam a importância de estudar tecnologias apropriadas para recuperar os metais pesados presentes na biomassa de microalgas produzida originária em águas residuárias.

Alternativas de redução de energia também podem ser implementadas durante a etapa de secagem de biomassa. Gouveia et al. (2016) compararam uma estufa de secagem com um protótipo de aquecedor solar em pequena escala, composto por uma câmara, que coleta a radiação solar para promover o aquecimento interno e um ventilador elétrico para forçar a ventilação do sistema. O aquecedor solar foi capaz de secar cerca de 1 a 2 kg de biomassa de 85% para 5% de teor de umidade em cerca de 3 a 4 horas e reduziu 86% do consumo de energia em comparação com a estufa (Gouveia et al., 2016).

6.5. Conclusão

Os principais resultados obtidos por esta pesquisa mostraram que o fertilizante organomineral, composto pela combinação de microalgas e ureia, tem impactos ambientais menores do que o fertilizante químico. Além disso, o incremento do percentual de biomassa na composição final favoreceu o aumento de impactos ambientais de todas as categorias de impacto avaliadas, exceto na categoria de consumo de água onde o incremento favoreceu a redução de impactos.

Os principais obstáculos para o uso de maiores percentuais de biomassa na composição final do fertilizante foram o elevado uso de NaOH como coagulante durante a etapa de colheita e o consumo de energia durante a etapa de cultivo. As emissões de NH₃ durante o cultivo da planta também influenciaram na geração de impactos nas categorias de eutrofização marinha, acidificação terrestre e formação de material particulado para todos os cenários avaliados, sendo a maior contribuição observada no cenário C6.

O cenário otimizado proposto mostrou a necessidade de aperfeiçoamento das etapas de colheita da biomassa para permitir menor geração de impactos ambientais e, dessa forma, garantir a viabilidade ambiental da recuperação de nutrientes presentes nas águas residuárias por meio da produção de biofertilizantes derivados de microalgas.

Referências

Albarelli, J.Q., Santos, D.T., Ensinas, A. V., Maréchal, F., Cocero, M.J., Meireles, M.A.A., 2018. Comparison of extraction techniques for product diversification in a supercritical water gasification-based sugarcane-wet microalgae biorefinery: Thermo-economic and environmental analysis. *J. Clean. Prod.* 201, 697–705.

Arashiro, L.T., Montero, N., Ferrer, I., Ación, F.G., Gómez, C., Garfí, M., 2018. Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Sci. Total Environ.* 622–623, 1118–1130.

Araújo, S., Marsola, T., Miyazawa, M., Henrique, L., Soares, D.B., 2009. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 44, 769–776.

Bussa, M., Zollfrank, C., 2020. Life-cycle assessment and geospatial analysis of integrating microalgae cultivation into a regional economy. *J. Clean. Prod.* 243.

Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Cecon, P.R., Assis, I.R. de, Ribeiro, V.J., 2017. Microalgae biofilm in soil: Greenhouse gas emissions, ammonia volatilization and plant growth. *Sci. Total Environ.* 574, 1640–1648.

Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Ferreira, J., Assemany, P.P., Ribeiro, V.J., 2020a. Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. *Sci. Total Environ.* 724.

Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Mattiello, E.M., Ribeiro, V.J., Assemany, P.P., 2020b. Algal biomass from wastewater: soil phosphorus bioavailability and plants productivity. *Sci. Total Environ.* 711, 135088.

Cherubini, E., Zanghelini, G.M., Alvarenga, R.A.F., Franco, D., Soares, S.R., 2015. Life cycle assessment of swine production in Brazil: A comparison of four manure management systems. *J. Clean. Prod.* 87, 68–77.

Choudhary, P., Prajapati, S.K., Malik, A., 2016. Screening native microalgal consortia for biomass production and nutrient removal from rural wastewaters for bioenergy applications. *Ecol. Eng.* 91, 221–230.

Collotta, M., Champagne, P., Mabee, W., Tomasoni, G., 2018. Wastewater and waste CO₂ for sustainable biofuels from microalgae. *Algal Res.* 29, 12–21.

Couto, E., Calijuri, M.L., Assemany, P., 2020. Biomass production in high rate ponds and hydrothermal liquefaction: Wastewater treatment and bioenergy integration. *Sci. Total Environ.* 724.

Das, P., Quadir, M.A., Thaher, M.I., Alghasal, G.S.H.S., Aljabri, H.M.S.J., 2019. Microalgal nutrients recycling from the primary effluent of municipal wastewater and use of the produced biomass as bio-fertilizer. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 3355–3364.

Dasan, Y.K., KeeLam, M., Yusup, S., WeiLim, J., Lee, K.T., 2019. Life cycle evaluation of microalgae biofuels production : Effect of cultivation system on energy , carbon emission and cost balance analysis. *Sci. Total Environ.* 688, 112–128.

Embrapa Informação Tecnológica, 2009. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, 2a ed. Brasília.

Farahani, S.S., Rajabipour, A., Keyhani, A., Sharifi, M., 2017. Energy use and economic analysis of NPK-15:8:15 fertilizer granulation process in Iran. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 16, 265–269.

Ferreira, J., de Assis, L.R., Oliveira, A.P. de S., Castro, J. de S., Calijuri, M.L., 2020. Innovative microalgae biomass harvesting methods: Technical feasibility and life cycle analysis. *Sci. Total Environ.* 746, 140939.

Gouveia, L., Graça, S., Sousa, C., Ambrosano, L., Ribeiro, B., Botrel, E.P., Neto, P.C., Ferreira, A.F., Silva, C.M., 2016. Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs. Scale-up considerations. *Algal Res.* 16, 167–176.

Gregorich, E., Janzen, H.H., Helgason, B., Ellert, B., 2015. Chapter Two - Nitrogenous Gas Emissions from Soils and Greenhouse Gas Effects, in: *Advances in Agronomy*. pp. 39–74.

Herrera, A., D’Imporzano, G., Acién Fernandez, F.G., Adani, F., 2020. Sustainable production of microalgae in raceways: Nutrients and water management as key factors influencing environmental impacts. *J. Clean. Prod.*

Hossain, N., Zaini, J., Meurah, T., Mahlia, I., 2019. Life cycle assessment , energy balance and sensitivity analysis of bioethanol production from microalgae in a tropical country. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 115, 109371.

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised life

cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 138–147.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2017. Série histórica de dados de 1998 a 2017 [WWW Document]. URL <http://www.inmet.gov.br/portal/> (accessed 9.15.19).

International Organization for Standardization, 2006a. ISO 14040 - Environmental Management - Life Cycle Assessment –Principles and Framework.

International Organization for Standardization, 2006b. ISO 14044 - Environmental Management - Life Cycle Assessment -Requires and Guidelines.

Jiang, Z., Zheng, H., Xing, B., 2021. Environmental life cycle assessment of wheat production using chemical fertilizer, manure compost, and biochar-amended manure compost strategies. *Sci. Total Environ.* 760, 143342.

Khan, S.A., Sharma, G.K., Malla, F.A., Kumar, A., 2019. Microalgae based biofertilizers: A biorefinery approach to phycoremediate wastewater and harvest biodiesel and manure. *J. Clean. Prod.* 211, 1412–1419.

Liu, Y., Lyu, Y., Tian, J., Zhao, J., Ye, N., Zhang, Y., Chen, L., 2021. Review of waste biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 139, 110716.

Magelli, F., Boucher, K., Bi, H.T., Melin, S., Bonoli, A., 2009. An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe. *Biomass and Bioenergy* 33, 434–441.

Mendonça, H.V. de, Assemany, P., Abreu, M., Couto, E., Maciel, A.M., Duarte, R.L., Barbosa dos Santos, M.G., Reis, A., 2021. Microalgae in a global world: New solutions for old problems? *Renew. Energy* 165, 842–862.

Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., Chau, K. wing, 2017. Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in Tehran Metropolis of Iran. *J. Clean. Prod.* 148, 427–440.

Nayak, M., Swain, D.K., Sen, R., 2019. Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.) crop. *Sci. Total Environ.* 682, 475–484.

Pereira, A.S.A. de P., Castro, J. de S., Ribeiro, V.J., Calijuri, M.L., 2021. Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth. *Sci. Total Environ.* 100295.

Pradel, M., Aissani, L., 2019. Environmental impacts of phosphorus recovery from a “product” Life Cycle Assessment perspective: Allocating burdens of wastewater treatment in the production of sludge-based phosphate fertilizers. *Sci. Total Environ.* 656, 55–69.

PRè, 2013. Introduction to LCA with SimaPro Colophon. San Francisco.

PRè, 2013. SimaPro database manual – methods library.

Renuka, N., Prasanna, R., Sood, A., Ahluwalia, A.S., Bansal, R., Babu, S., Singh, R., Shivay, Y.S., Nain, L., 2016. Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 6608–6620.

Schneider, R. de C. de S., de Moura Lima, M., Hoeltz, M., de Farias Neves, F., John, D.K., de Azevedo, A., 2018. Life cycle assessment of microalgae production in a raceway pond with alternative culture media. *Algal Res.* 32, 280–292.

Silambarasan, S., Logeswari, P., Sivaramakrishnan, R., Incharoensakdi, A., Cornejo, P., Kamaraj, B., Chi, N.T.L., 2021. 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.

Silva, G.H.R., Sueitt, A.P.E., Haines, S., Tripidaki, A., van Zwieten, R., Fernandes, T. V., 2019. Feasibility of closing nutrient cycles from black water by microalgae-based technology. *Algal Res.* 44, 101715.

Soares, R.B., Martins, M.F., Gonçalves, R.F., 2019. A conceptual scenario for the use of microalgae biomass for microgeneration in wastewater treatment plants. *J. Environ. Manage.* 252, 109639.

Souza, M.H.B. de, Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Castro, J.D.S., Oliveira, A.C.M. de, 2019. Soil application of microalgae for nitrogen recovery: A life-cycle approach. *J. Clean. Prod.* 211, 342–349.

Suleiman, A.K.A., Lourenço, K.S., Clark, C., Luz, R.L., da Silva, G.H.R., Vet, L.E.M., Cantarella, H., Fernandes, T. V., Kuramae, E.E., 2020. From toilet to agriculture: Fertilization with microalgal biomass from wastewater impacts the soil and rhizosphere active microbiomes, greenhouse gas emissions and plant growth. *Resour. Conserv. Recycl.* 161, 104924.

Sun, C., Xia, A., Liao, Q., Fu, Q., Huang, Y., Zhu, X., 2019. Life-cycle assessment of biohythane production via two-stage anaerobic fermentation from microalgae and food waste. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 112, 395–410.

Sutherland, D.L., Turnbull, M.H., Craggs, R.J., 2014. Increased pond depth improves algal productivity and nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds. *Water Res.* 53, 271–281.

Ye, C., Mu, D., Horowitz, N., Xue, Z., Chen, J., Xue, M., Zhou, Y., Klutts, M., Zhou, W., 2018. Life cycle assessment of industrial scale production of spirulina tablets. *Algal Res.* 34, 154–163.

Wu, H., MacDonald, G.K., Galloway, J.N., Zhang, L., Gao, L., Yang, L., Yang, J., Li, X., Li, H., Yang, T., 2020. The influence of crop and chemical fertilizer combinations on greenhouse gas emissions: A partial life-cycle assessment of fertilizer production and use in China. *Resour. Conserv. Recycl.* 4.

Wuang, S.C., Khin, M.C., Chua, P.Q.D., Luo, Y.D., 2016. Use of Spirulina biomass produced from treatment of aquaculture wastewater as agricultural fertilizers. *Algal Res.* 15, 59–64.

Xiao, C., Fu, Q., Liao, Q., Huang, Y., Xia, A., Chen, H., 2019. Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. *Renew. Energy.*

7. CONCLUSÃO GERAL

Os resultados obtidos no presente trabalho oferecem dados importantes para o desenvolvimento de tecnologias além de subsidiar outros estudos sobre a recuperação de recursos. O tratamento de águas residuárias em lagoas de alta taxa permite a reciclagem dos nutrientes, por meio da produção de biomassa de microalgas, e posterior uso no contexto agrícola como fertilizantes, devido a possibilidade de incremento de nutrientes no solo e maior viabilidade ambiental da produção de plantas em comparação com fertilizante químico. Os estudos realizados permitiram concluir:

- O fertilizante composto por BM e fertilizante sintético, em diferentes proporções, permitiu maiores taxas de recuperação de N pelas plantas para os tratamentos com 15 e 30 % e estimou-se que a maior recuperação aconteceria na proporção de 25% de MB;
- Os tratamentos analisados não obtiveram diferença entre eles no que diz respeito a volatilização de amônia durante a aplicação no solo;
- É necessário aprimoramento da etapa de colheita da BM para possibilitar a produção mais eficiente de um fertilizante composto de microalgas;
- Na maioria das categorias avaliadas, o fertilizante organomineral tem impactos ambientais menores do que o fertilizante químico;
- O incremento do percentual de BM favoreceu o aumento de impactos ambientais de todas as categorias de impacto avaliada, exceto na categoria de consumo de água, onde foi observado o contrário;
- As emissões de NH_3 durante o cultivo da planta influenciaram diretamente na geração de impactos nas categorias de eutrofização marinha, acidificação terrestre e formação de material particulado para todos os cenários avaliados, sendo a maior contribuição observada no fertilizante químico.

8. CONSIDERAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As principais necessidades de pesquisas no que diz respeito ao uso de biomassa de microalgas como fertilizantes são investigar o uso de inibidores de urease para a redução da volatilização de NH_3 , assim como outros fertilizantes comerciais menos impactantes que a ureia. Além disso, recomenda-se investigar maiores proporções de biomassa de microalgas no biofertilizante final e processos que otimizem a produção de microalgas em lagoas de alta taxa, como também aperfeiçoar a etapa de colheita de forma a evitar o uso de insumos químicos. É importante também que os estudos futuros avaliem os efeitos provocados na toxicidade do solo devido a esta aplicação do fertilizante derivado de microalgas, principalmente devido a possibilidade de metais pesados nas microalgas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arashiro, L.T., Montero, N., Ferrer, I., Ación, F.G., Gómez, C., Garfí, M., 2018. Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Sci. Total Environ.* 622–623, 1118–1130.
- Bussa, M., Zollfrank, C., 2020. Life-cycle assessment and geospatial analysis of integrating microalgae cultivation into a regional economy. *J. Clean. Prod.* J. 243.
- Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Cecon, P.R., Assis, I.R. de, Ribeiro, V.J., 2017. Microalgae biofilm in soil : Greenhouse gas emissions , ammonia volatilization and plant growth. *Sci. Total Environ.* 574, 1640–1648.
- Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Ferreira, J., Assemany, P.P., Ribeiro, V.J., 2020a. Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. *Sci. Total Environ.* 724.
- Castro, J. de S., Calijuri, M.L., Mattiello, E.M., Ribeiro, V.J., Assemany, P.P., 2020b. Algal biomass from wastewater: soil phosphorus bioavailability and plants productivity. *Sci. Total Environ.* 711, 135088.
- Choudhary, P., Prajapati, S.K., Malik, A., 2016. Screening native microalgal consortia for biomass production and nutrient removal from rural wastewaters for bioenergy applications. *Ecol. Eng.* 91, 221–230.
- Collotta, M., Champagne, P., Mabee, W., Tomasoni, G., 2018. Wastewater and waste CO₂ for sustainable biofuels from microalgae. *Algal Res.* 29, 12–21.
- Das, P., Quadir, M.A., Thaher, M.I., Alghasal, G.S.H.S., Aljabri, H.M.S.J., 2019. Microalgal nutrients recycling from the primary effluent of municipal wastewater and use of the produced biomass as bio-fertilizer. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 3355–3364.
- Dasan, Y.K., KeeLam, M., Yusup, S., WeiLim, J., Lee, K.T., 2019. Life cycle evaluation of microalgae biofuels production : Effect of cultivation system on energy , carbon emission and cost balance analysis. *Sci. Total Environ.* 688, 112–128.
- Gregorich, E., Janzen, H.H., Helgason, B., Ellert, B., 2015. Chapter Two - Nitrogenous Gas Emissions from Soils and Greenhouse Gas Effects, in: *Advances in Agronomy.* pp. 39–74.
- Herrera, A., D’Imporzano, G., Ación Fernandez, F.G., Adani, F., 2020. Sustainable production of microalgae in raceways: Nutrients and water management as key factors

influencing environmental impacts. *J. Clean. Prod.*

Hossain, N., Zaini, J., Meurah, T., Mahlia, I., 2019. Life cycle assessment , energy balance and sensitivity analysis of bioethanol production from microalgae in a tropical country. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 115, 109371.

Khan, S.A., Sharma, G.K., Malla, F.A., Kumar, A., 2019. Microalgae based biofertilizers : A biore fi nery approach to phycoremediate wastewater and harvest biodiesel and manure. *J. Clean. Prod.* 211, 1412–1419.

Kumar, M., Sun, Y., Rathour, R., Pandey, A., Thakur, I.S., Tsang, D.C.W., 2020. Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges. *Sci. Total Environ.* 716, 137116.

Liu, Y., Lyu, Y., Tian, J., Zhao, J., Ye, N., Zhang, Y., Chen, L., 2021. Review of waste biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 139, 110716.

Mendonça, H.V. de, Assemany, P., Abreu, M., Couto, E., Maciel, A.M., Duarte, R.L., Barbosa dos Santos, M.G., Reis, A., 2021. Microalgae in a global world: New solutions for old problems? *Renew. Energy* 165, 842–862.

Nayak, M., Swain, D.K., Sen, R., 2019. Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.)crop. *Sci. Total Environ.* 682, 475–484.

Renuka, N., Prasanna, R., Sood, A., Ahluwalia, A.S., Bansal, R., Babu, S., Singh, R., Shivay, Y.S., Nain, L., 2016. Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 6608–6620.

Silambarasan, S., Logeswari, P., Sivaramakrishnan, R., Incharoensakdi, A., Cornejo, P., Kamaraj, B., Chi, N.T.L., 2021. 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.

Silva, G.H.R., Sueitt, A.P.E., Haimes, S., Tripidaki, A., van Zwieten, R., Fernandes, T. V., 2019. Feasibility of closing nutrient cycles from black water by microalgae-based technology. *Algal Res.* 44, 101715.

Soares, R.B., Martins, M.F., Gonçalves, R.F., 2019. A conceptual scenario for the use of

microalgae biomass for microgeneration in wastewater treatment plants. *J. Environ. Manage.* 252, 109639.

Souza, M.H.B. de, Calijuri, M.L., Assemany, P.P., Castro, J.D.S., Oliveira, A.C.M. de, 2019. Soil application of microalgae for nitrogen recovery: A life-cycle approach. *J. Clean. Prod.* 211, 342–349.

Suleiman, A.K.A., Lourenço, K.S., Clark, C., Luz, R.L., da Silva, G.H.R., Vet, L.E.M., Cantarella, H., Fernandes, T. V., Kuramae, E.E., 2020. From toilet to agriculture: Fertilization with microalgal biomass from wastewater impacts the soil and rhizosphere active microbiomes, greenhouse gas emissions and plant growth. *Resour. Conserv. Recycl.* 161, 104924.

Xiao, C., Fu, Q., Liao, Q., Huang, Y., Xia, A., Chen, H., 2019. Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. *Renew. Energy.*

ANEXO

Produtos originados dessa dissertação.

Pereira, A.S.A. de P., Castro, J. de S., Ribeiro, V.J., Calijuri, M.L., 2021. Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth. *Sci. Total Environ.* 779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146205>



Organomineral fertilizers pastilles from microalgae grown in wastewater: Ammonia volatilization and plant growth



Alexia Saleme Aona de Paula Pereira ^{*}, Jackeline de Siqueira Castro, Vinícius José Ribeiro, Maria Lúcia Calijuri

Federal University of Viçosa, Department of Civil Engineering, Viçosa, Minas Gerais, Brazil

HIGHLIGHTS

- A fertilizer composed of microalgae and urea in distinct proportions is proposed.
- The nitrogen assimilation capacity by plants and effect in the soil were assessed.
- 40% MB presented the highest accumulated ammonia volatilization.
- The maximum N content is reached in the proportion of 25% MB.
- The highest N recovery rates by plants were achieved with 15% and 30% MB.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 November 2020

Received in revised form 22 February 2021

Accepted 25 February 2021

Available online 3 March 2021

Editor: Huu Hao Ngo

Keywords:

Microalgae
Ammonia volatilization
Nutrient recycling
Nitrogen fertilizer

ABSTRACT

With the increasing demand for food, it is increasingly important to maintain soil fertility with the application of fertilizers to supply the nutritional needs of plants. However, the nutrients applied to the soil can suffer significant losses, impacting the environment, and increasing production costs. Using alternative sources, such as microalgae biomass (MB) generated in the treatment of wastewater, in the production of organomineral fertilizers is a way to recover nutrients from the sewage, in addition to contributing to the improvement in soil fertility and favoring crop growth, which can guarantee agricultural sustainability. In the present study, MB was grown in the effluent from the food industry and, subsequently, a pelleted organomineral fertilizer (POF) was produced consisting of the combination of MB and synthetic fertilizer (urea), in different proportions. The performance of the proposed fertilizer was analyzed for losses due to ammonia volatilization (N-NH₃) over time, for nitrogen assimilation capacity (N) by corn plants (*Zea mays* L.), and its structure was evaluated by scanning electron microscopy. The study concluded that the highest accumulated volatilization of N-NH₃ was in the proportion of 40% of MB and the maximum content of N is reached in the proportion of 24.55% of MB. From the proportion of 25% of MB, there is no increase in N absorbed by plants, at the same time that the volatilization of N-NH₃ grows with the increase in MB. The most important factors for obtaining these results were the interaction between MB and urea in the produced organomineral fertilizer tablet, where an increasingly thicker physical barrier was formed with the increase in the proportion of MB; in addition to the POF pH, in which the increase in MB proportions directly favored the pH increase.

© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

^{*} Corresponding author at: Department of Civil Engineering, Federal University of Viçosa (Universidade Federal de Viçosa/UFV), Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, Minas Gerais 36570-900, Brazil.

E-mail addresses: alexia.pereira@ufv.br (A.S.A.P. Pereira), jackelinesiqueiracastro@yahoo.com.br (J.S. Castro), vj.ribeiro@yahoo.com.br (V.J. Ribeiro), lucia.calijuri@gmail.com (M.L. Calijuri).

1. Introduction

The constant need to increase food production imposes extra charges on the soil, making the use of chemical fertilizers inevitable. However, much is discussed about the efficiency of these fertilizers in