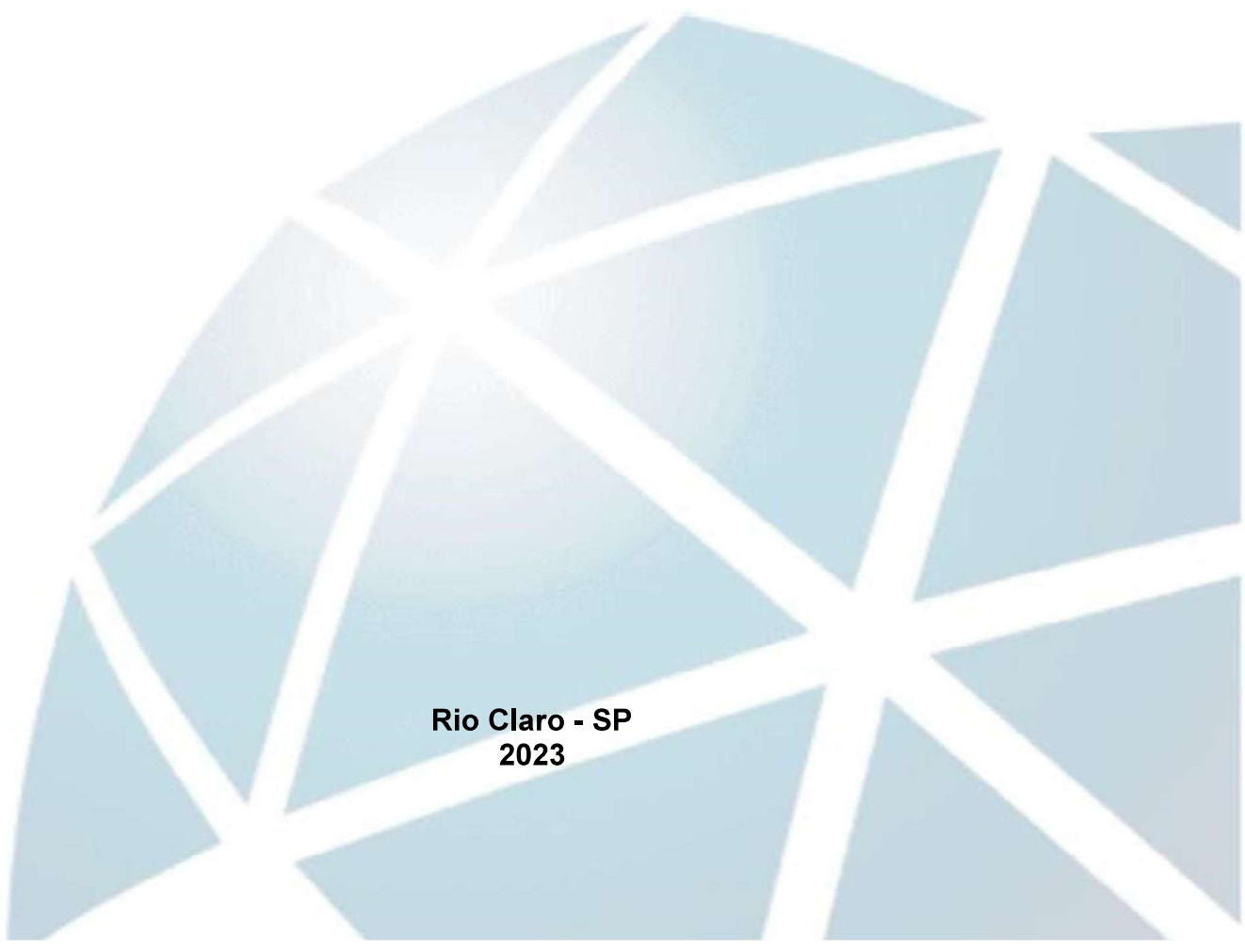

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGIA
CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**ANÁLISE ECOTOXICOLÓGICA DE FERTILIZANTES A BASE DE VIDROS
ÓXIDOS MULTICOMPONENTES**

THOMAZ WILLIAM BOAVENTURA

A large, abstract geometric pattern in shades of blue and white covers the bottom half of the page. It consists of various triangles and polygons of different sizes and orientations, creating a complex, crystalline structure.

**Rio Claro - SP
2023**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGIA
CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**ANÁLISE ECOTOXICOLÓGICA DE FERTILIZANTES A BASE DE VIDROS
ÓXIDOS MULTICOMPONENTES**

THOMAZ WILLIAM BOAVENTURA

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas (Biologia Celular, Molecular e Microbiologia).

Orientadora: Prof^a Dr^a Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo

B662a	Boaventura, Thomaz William Análise ecotoxicológica de fertilizantes a base de vidros óxidos multicomponentes / Thomaz William Boaventura. -- Rio Claro, 2023 96 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro Orientadora: Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo 1. Fertilizante vítreo. 2. Ecotoxicidade. 3. Fitotoxicidade. 4. Genotoxicidade. 5. Citotoxicidade. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A contínua expansão do agronegócio brasileiro tornou o país um dos maiores consumidores de fertilizantes do mundo, além de um dos maiores importadores do produto (resultado da baixa produção de fertilizantes nacionais e alta demanda). Assim, a produção e emprego do fertilizante vítreo aqui estudado pode permitir que o Brasil se torne menos dependente dos grandes exportadores, expandindo a economia nacional, além de favorecer os pequenos produtores pela possibilidade de aquisição de um fertilizante não dolarizado. Adicionalmente, a análise conjunta dos resultados desta pesquisa contribui significativamente para avanços na área de Meio Ambiente e Agricultura, colaborando com os objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 propostos pela ONU. Entre eles destacam-se os 2, 6, 8, 11, 12, 13 e 15, que incluem temas como Fome Zero e Agricultura Sustentável, Água Potável e Saneamento, Trabalho Decente e Crescimento Econômico, Cidades e Comunidades Sustentáveis, Consumo e Produção Responsáveis, Ação Contra a Mudança Global do Clima e Vida Terrestre. Os fertilizantes vítreos apresentam diversas vantagens por possuírem uma dissolução uniforme dos componentes, ação prolongada, solubilização completa (sem deixar resíduos), facilidade de obtenção, liberação lenta, uma alta versatilidade composicional e baixo risco ambiental. Assim, seu uso em substituição aos fertilizantes convencionais evitaria problemas ambientais ocasionados pela acidificação e acúmulo excessivo de nutrientes no solo; lixiviação, com consequente eutrofização de rios e lagos; contaminação de águas subterrâneas; aquecimento global, pela liberação de gases de efeito estufa; e mortalidade de organismos não-alvo, contribuindo para uma agricultura mais sustentável.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The continuous expansion of Brazilian agribusiness has propelled the country into becoming one of the world's largest consumers of fertilizers, as well as a prominent importer of this product. This is primarily due to the low domestic production of fertilizers and the high demand within the nation. Thus, the production and use of the glass fertilizer studied here may allow Brazil to become less dependent on large exporters, expanding the national economy, in addition to favoring small producers due to the possibility of acquiring a non-dollarized fertilizer. Moreover, the joint analysis of

the results of this research contributes significantly to advances in the area of Environment and Agriculture, collaborating with the sustainable development objectives of the 2030 Agenda proposed by the UN. Among them, 2, 6, 8, 11, 12, 13 and 15 stand out, which include topics such as Zero Hunger and Sustainable Agriculture, Clean Water and Sanitation, Decent Work and Economic Growth, Sustainable Cities and Communities, Responsible Consumption and Production, Climate Action and Life on Land. Glass fertilizers have several advantages due to their uniform dissolution of the components, prolonged action, complete solubilization (without leaving residues), ease of obtaining, slow release, high compositional versatility and low environmental risk. Thus, its use instead of conventional fertilizers would avoid environmental problems caused by acidification and excessive accumulation of nutrients in the soil; leaching, with consequent eutrophication of rivers and lakes; groundwater contamination; global warming, through the release of greenhouse gases; and mortality of non-target organisms, contributing to a more sustainable agriculture.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE ECOTOXICOLÓGICA DE FERTILIZANTES A BASE DE VIDROS ÓXIDOS MULTICOMPONENTES

AUTOR: THOMAZ WILLIAM BOAVENTURA

ORIENTADORA: DÂNIA ELISA CHRISTOFOLETTI MAZZEO MORALES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Biológicas (Biologia Celular, Molecular e Microbiologia), área: Diversidade Biológica e Biologia Ambiental pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

DANIA ELISA CHRISTOFOLETTI MAZZEO M

Data: 22/08/2023 11:53:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. DÂNIA ELISA CHRISTOFOLETTI MAZZEO MORALES (Participação Virtual)
Departamento de Biotecnologia e Produção Vegetal e Animal / UFSCar



Prof. Dr. MATHEUS MANTUANELLI ROBERTO (Participação Virtual)
UNIARARAS

Profa. Dra. DANIELA MORAIS LEME (Participação Virtual)
Universidade Federal do Paraná



Documento assinado digitalmente

DANIELA MORAIS LEME

Data: 18/08/2023 13:40:27-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Claro, 18 de agosto de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por não pouparem esforços para que fosse possível concluir meu curso de graduação, e posteriormente, o mestrado.

À professora Dânia, por ter aceitado a orientação durante o período de pouco mais de dois anos, pelos ensinamentos, calma, paciência e dedicação constante para que este trabalho se desenvolvesse da melhor maneira possível. Fico muito feliz e realizado por poder ter a oportunidade de ter sido seu aluno, você é uma das minhas inspirações pessoais.

Às professoras Marin e Dejanira por terem me acolhido em seus laboratórios, fazendo com que fosse possível o desenvolvimento da parte prática da pesquisa. Agradeço também às técnicas dos laboratórios, Adriana e Dilza por todo o apoio durante as atividades de laboratório, pelos ensinamentos e pelo cuidado com o ambiente de trabalho.

Aos meus colegas de laboratório: Leticia Rosa, Matheus, Prolo, Letícia Gigeck, Jossandra, Bruna, Ana Damasceno, Giovana Fernandes e Giovanna Lima portodo o apoio prestado e contribuições no desenvolvimento deste trabalho, sem vocêsesse momento não teria sido tão especial.

Agradeço em especial à Letícia Rosa, pelo empréstimo do microscópio após o incêndio acometido no prédio do Instituto de Biociências, responsável pela destruição dos equipamentos necessários para esse trabalho, fazendo com que fosse possível finalizar a parte de análise celular. Muito obrigado não apenas pela comoção, mas também pela amizade maravilhosa que surgiu fruto desse trabalho. Agradeço pelas conversas, pelas risadas, cafezinhos com bolo de cenoura, cantorias e várias outras obras que eu poderia escrever ao longo de um livro. Enfim, sua presença tornouesse momento tão cansativo da vida acadêmica, muito mais agradável!

Aos professores e funcionários do Departamento de Biologia Geral e Aplicadae ao Instituto de Biociências da UNESP de Rio Claro, por todo o suporte.

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, GM GD 2020 - Apoio a projetos de pesquisa científica, tecnológica e de inovação - Bolsas de Mestrado, Processo 157496/2021-0.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste projeto, meus sinceros agradecimentos!

"Apesar de tudo eu ainda creio na bondade humana."

- Anne Frank

Resumo

O uso de fertilizantes está diretamente relacionado com o aumento da produtividade agrícola em todo o mundo. Por outro lado, a utilização constante de fertilizantes minerais pode acarretar em poluição ambiental e, conseqüentemente, em malefícios para a biota, além de apresentar baixa eficiência no que se refere à absorção de nutrientes pelas plantas. Dessa forma, novas técnicas de fertilização vêm sendo desenvolvidas para que a produção agrícola ocorra de forma eficiente, sustentável e com um excelente custo benefício. Entre essas novas tecnologias, destacam-se os fertilizantes inteligentes, como os fertilizantes vítreos, com capacidade de liberar lentamente os nutrientes de acordo com as necessidades nutricionais das plantas. Contudo, pouco se sabe sobre a toxicidade destes materiais para os organismos. Assim, o presente estudo buscou avaliar os possíveis impactos ecotoxicológicos de um fertilizante vítreo óxido multicomponente, de liberação lenta, a partir de testes de fitotoxicidade com *Lactuca sativa*, citogenotoxicidade com *Allium cepa* e respiração microbiana do solo por meio de ensaios de respirometria. Os testes foram realizados com cinco concentrações diferentes (0,317 g/L; 0,633 g/L; 1,267 g/L; 2,534 g/L; 5,063 g/L), com a aplicação do fertilizante diretamente em solo e, também, com o extrato aquoso, após 24h, 48h, 72h, 120h e 144h de solubilização. As análises mostraram que o fertilizante pode ser considerado potencialmente fitotóxico e genotóxico em altas concentrações e em longos períodos de liberação quando dissolvido em água, evidenciando a necessidade de estabelecer uma concentração ideal de aplicação. Contudo, pela aplicação direta do fertilizante no solo, nenhum efeito tóxico foi observado. O fertilizante foi ainda capaz de impulsionar a microbiota natural do solo, o que pode contribuir com a produtividade agrícola. Os resultados indicam que o uso deste fertilizante é promissor, em termos ambientais, o que pode contribuir para a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e favorecer o cumprimento dos objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Palavras-chave: Fertilizante vítreo; Agricultura sustentável; Ecotoxicidade; *Lactuca sativa*; *Allium cepa*; Respirometria.

Abstract

The use of fertilizers is directly related to the increase in agricultural productivity worldwide. On the other hand, the constant use of mineral fertilizers can lead to environmental pollution and, consequently, harm to the biota, in addition to presenting low efficiency with regard to the absorption of nutrients by plants. In this way, new fertilization techniques have been developed so that agricultural production occurs efficiently, sustainably and with an excellent cost benefit. Among these new technologies, smart fertilizers stand out, such as glass fertilizers, with the ability to slowly release nutrients according to the nutritional needs of plants. However, little is known about the toxicity of these materials to organisms. Thus, the present study sought to analyze the possible ecotoxicological impacts of a multicomponent slow-release vitreous oxide fertilizer phytotoxicity tests with *Lactuca sativa*, cytogenotoxicity with *Allium cepa* and soil microbial respiration through respirometry tests. The tests were carried out with five different concentrations (0.317 g/L; 0.633 g/L; 1.267 g/L; 2.534 g/L; 5.063 g/L), with the application of the fertilizer directly to the soil and also with the aqueous extract, after 24h, 48h, 72h, 120h and 144h of solubilization. The analyzes showed that the fertilizer can be considered environmentally phytotoxic and genotoxic at high concentrations and at long release periods when dissolved in water, highlighting the need to establish an ideal application concentration. However, by direct application of fertilizer to the soil, no toxic effects were applied. The fertilizer was even able to contribute to the natural microbiota of the soil, which can contribute to agricultural productivity. The results indicate that the use of this fertilizer is promising, in environmental terms, which can contribute to the promotion of more sustainable agricultural practices and favor the fulfillment of the sustainable development objectives of the 2030 Agenda, proposed by the United Nations (UN).

Keywords: Glass fertilizer; Sustainable agriculture; Ecotoxicity; *Lactuca sativa*; *Allium cepa*; Respirometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fertilizante vítreo multicomponente.....	26
----------	--	----

Artigo 1

Figura 1	Resultado da liberação dos nutrientes do fertilizante a partir da Análise por ICP OES no tempo de 144h de liberação.....	38
Figura 2	Comprimento da radícula e do hipocótilo de <i>L. sativa</i> expostas asoluções aquosas do fertilizante vítreo.....	41
Figura 3	Comparação entre os índices de germinação obtidos no ensaio de fitotoxicidade com <i>L. sativa</i> , após exposição a diferentes soluções aquosas do fertilizante.....	43
Figura 4	Comparação entre os índices mitóticos obtidos no ensaio de citotoxicidade com <i>A. cepa</i> , após exposição a diferentes soluções aquosas do fertilizante.....	45
Figura 5	Aberrações cromossômicas e alterações nucleares observadas nos ensaios de genotoxicidade em células meristemáticas de <i>Allium cepa</i>	48

Artigo 2

Figura 1	Esquema do respirômetro de Bartha.....	65
Figura 2	Reta analítica da produção de CO ₂ em função da condutividade medida em solução.....	67
Figura 3	Comprimento da radícula e hipocótilo de <i>L. sativa</i> exposta a diferentes concentrações do fertilizante vítreo em solo.....	69
Figura 4	Comparação entre os índices de germinação do ensaio de fitotoxicidade com <i>L. sativa</i> após exposição ao solo contendo diferentes concentrações do fertilizante vítreo.....	70
Figura 5	Comparação entre os índices mitóticos obtidos no ensaio de citotoxicidade com <i>A. cepa</i> , após exposição a diferentes concentrações do fertilizante vítreo.....	71
Figura 6	Produção microbiana semanal de CO ₂ em solos contendo o fertilizante vítreo.....	74
Figura 7	Produção Acumulada de CO ₂	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Principais exportadores de fertilizantes para o Brasil, dados de janeiro a dezembro de 2022.....	20
----------	--	----

Artigo 1

Tabela 1	Reagentes e respectivas porcentagens das massas utilizados na síntese do vidro multicomponente padrão.....	32
Tabela 2	Quantificação dos nutrientes liberados por solubilização do fertilizante vítreo em água, analisado por ICP OES.....	36
Tabela 3	Valores de pH das amostras solubilizadas nas cinco concentrações e tempos de solubilização.....	40
Tabela 4	Taxa de germinação relativa (%) de sementes de <i>L. sativa</i> expostas às amostras solubilizadas do fertilizante vítreo.....	40
Tabela 5	Taxa de genotoxicidade (%) em <i>A. cepa</i> com amostras solubilizadas.....	46

Artigo 2

Tabela 1	Reagentes e respectivas porcentagens das massas utilizados na síntese do vidro multicomponente padrão.....	60
Tabela 2	Caracterização físico-química do solo arenoso utilizado nos experimentos.....	61
Tabela 3	Germinação relativa (%) em <i>L. sativa</i> de sementes expostas ao fertilizante vítreo adicionado ao solo.....	68
Tabela 4	Taxa de genotoxicidade (%) em <i>A. cepa</i> com diferentes concentrações de teste.....	72
Tabela 5	Quantificação de bactérias heterotróficas e fungos presentes nas amostras.....	73

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AC	Aberrações Cromossômicas
B	Boro
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
CO ₂	Gás Carbônico
CN	Controle Negativo
CR	Crescimento Relativo
CP	Controle Positivo
Cu	Cobre
EUA	Estados Unidos da América
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
Fe	Ferro
GR	Germinação Relativa
H	Hidrogênio
ICP OES	<i>Inductively coupled plasma optical emission spectrometry</i>
IG	Índice de Germinação
IM	Índice Mitótico
K	Potássio
Mg	Magnésio
MN	Micronúcleo
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
Nh ₃	Amônio
N ₂ O	Óxido Nitroso
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
PCA	<i>Plate Count Agar</i>
PIB	Produto Interno Bruto
S	Enxofre
Si	Silício
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1 Introdução e justificativa.....	14
2 Revisão da Literatura.....	17
2.1 Produção agrícola e o consumo de fertilizantes no Brasil e no mundo.....	17
2.2 Produtores e exportadores de fertilizantes.....	19
2.3 Danos ambientais ocasionados pelos fertilizantes tradicionais.....	20
2.4 Materiais alternativos aos fertilizantes tradicionais.....	21
2.5 Ensaio ecotoxicológicos.....	22
2.5.1 Fitotoxicidade.....	23
2.5.2 Citogenotoxicidade.....	24
2.5.3 Respiração do solo.....	24
3 Objetivos.....	25
4 Material e método.....	26
5 Resultados e Discussão.....	27
5.1 Avaliação fitotóxica e citogenotóxica de fertilizante a base de vidros óxidos multicomponentes, visando à agricultura sustentável.....	28
5.2 Análise ecotoxicológica de fertilizante a base de vidros óxidos multicomponentes aplicados em solo: uma alternativa sustentável para a agricultura.....	56
6 Considerações finais.....	84
7 Referências.....	85

1 Introdução e justificativa

No Brasil, um dos setores econômicos mais importantes é o agronegócio, que movimentou, no ano de 2020, mais de R\$ 100 bilhões, colocando o país em quarto lugar no ranking de maior produtor mundial de alimentos (OLIVEIRA; MALAGOLLI; CELLA, 2019). Condizente com a contínua expansão do agronegócio nacional, os índices de uso de agrotóxicos e fertilizantes também aumentaram continuamente a partir da década de 90, onde se registrou um aumento significativo da produtividade, principalmente, em decorrência do uso de fertilizantes no solo (JANK; NASSAR; TACHINARDI, 2005). Desde então, existe um grande incentivo no desenvolvimento de pesquisas e novas tecnologias que possam contribuir para a melhoria desse setor, uma vez que a demanda por alimentos que atendam a necessidade da população mundial crescente está entre os grandes desafios deste século (BHAT; JÖUDU, 2019).

Dentre os insumos agrícolas, os fertilizantes representam um recurso básico e essencial da nutrição agrícola que confere eficiência à produção. Atualmente, mais de 48% da população mundial possui alimentação garantida pela produção agrícola por meio do emprego de fertilizantes nitrogenados, uma vez que, sem o seu uso, apenas metade dos alimentos seria produzida e uma quantidade maior de paisagens naturais teria que ser convertida em culturas agrícolas para manter a alimentação da população mundial (REETZ, 2017; MACIEL; TUNES, 2021).

Para atingir uma condição ótima de crescimento, a planta necessita ter acesso a quantidades ideais de macronutrientes (N, P, K, H, Mg, Ca e S) emicronutrientes (B, Cl, Mn, Fe, Zn, Cu e Mo), a fim de garantir seu desenvolvimento saudável (AFTAB; HAKEEM, 2020). Dentre os macronutrientes, o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) representam os principais minerais para a promoção do crescimento vegetal (BAHADUR; MEENA; KUMAR, 2014) e, por isso, constituem a base dos fertilizantes minerais. Contudo, embora requeridos em menor quantidade, os demais também desempenham importantes papéis na fisiologia do vegetal. Os micronutrientes, por exemplo, estão relacionados aos mecanismos de defesa contra doenças, participando como cofatores na ativação de enzimas (SOLANKEY *et al.*, 2020).

Assim, para garantir uma alta produtividade e suprir a perda de nutrientes do solo degradado pelo intenso uso agrícola, a aplicação de fertilizantes tradicionais em culturas agrícolas representa uma das principais práticas adotadas nos dias atuais

(JAMIL *et al.*, 2021). No entanto, a maior parte dos nutrientes que são adicionados ao solo não é absorvida pelas plantas, ocasionando sérios problemas ambientais, além de representar um custo adicional desnecessário ao agricultor e um desperdício dos recursos minerais naturais (YE *et al.*, 2020). Sabe-se que apenas 50%, 10% e 2% do total de N, P e K adicionado ao solo, respectivamente, são aproveitados pelas plantas (COSTA *et al.*, 2012; SHANWARE; KALKAR; TRIVEDI, 2014; SIMPSON *et al.*, 2011).

Dentre os prejuízos ambientais ocasionados por essa prática, encontram-se a degradação do solo pela introdução de contaminantes (p.e., metais), interferência na ciclagem de nutrientes, a acidificação e a salinização deste meio (TETTEH, 2015; ZHANG *et al.*, 2019). O excesso na aplicação de fertilizantes também pode acarretar na lixiviação acentuada de nutrientes para corpos hídricos próximos, especialmente N e P, promovendo a eutrofização de ambientes aquáticos (AYELE; ATLABACHEW, 2021). Além disso, o uso indiscriminado de fertilizantes também contribui, significativamente, para a geração de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono, óxido nitroso e metano (WANG *et al.*, 2017).

Desse modo, com a finalidade de atingir a otimização da produção e possibilitar a utilização eficiente e sustentável dos recursos disponíveis, bem como contribuir para preservação dos ecossistemas, pesquisadores vêm desenvolvendo novas tecnologias com foco na nutrição das plantas, para a melhoria do manejo de nutrientes (REETZ, 2017).

Tendo em vista os estudos que demonstram uma baixa eficiência na absorção dos nutrientes presentes nos fertilizantes minerais pelas plantas, pesquisadores buscam desenvolver um “fertilizante inteligente”, que se adeque às necessidades das plantas de forma que a liberação dos nutrientes aconteça de maneira controlada ou lenta, a fim de otimizar sua absorção, sem que aconteça uma rápida lixiviação dos nutrientes como ocorre nos fertilizantes convencionais (MENDONÇA *et al.*, 2006; BORSARI, 2013). Esses fertilizantes de liberação lenta reduzem as perdas de nutrientes, como do nitrato por lixiviação e volatilização de amônia, minimizando o risco de contaminação ambiental. Ainda, apesar de apresentarem um custo mais elevado do que os fertilizantes tradicionais, oferecem melhor custo-benefício devido ao completo aproveitamento dos nutrientes, levando a uma menor necessidade de aplicação e diminuição de custos com mão de obra, armazenagem, transporte, entre outros (BORSARI, 2013). Além disso, este tipo de fertilizante confere precisão às

culturas agrícolas, tornando possível alterar a composição do material de forma que a liberação dos nutrientes aconteça da maneira desejada (MOURA, 2019). Uma vez que cada planta apresenta uma fisiologia específica e uma demanda diferenciada em relação às concentrações dos macro e micronutrientes (NADEEM *et al.*, 2018), o emprego dos "fertilizantes inteligentes" representa um avanço para o setor agrícola.

Adicionalmente, a dependência do Brasil quanto à importação de fertilizantes ressalta a importância do desenvolvimento e produção nacional de fertilizantes eficientes, que comportem a demanda do país. Com base em dados referentes ao ano de 2017, 24% dos fertilizantes nitrogenados, 20% dos fertilizantes potássicos e 14% dos fosfatados tiveram como origem a Rússia (OLIVEIRA; MALAGOLLI; CELLA, 2019). Com o início das invasões russas na Ucrânia, houve um impacto direto sobre o fornecimento de fertilizantes, afetando países como o Brasil, que mantinham relação de dependência com os dois antagonistas.

Neste sentido, os fertilizantes vítreos destacam-se por serem uma alternativa mais viável frente aos rotineiramente utilizados, principalmente pela sua versatilidade composicional, facilidade de obtenção, dissolução uniforme dos componentes, liberação lenta dos elementos presentes na sua estrutura, completa solubilização em água e não gerar subprodutos (MOURA, 2019).

A avaliação ecotoxicológica provê dados sobre os danos de substâncias químicas ao ecossistema, fornecendo informações a respeito dos malefícios causados à saúde e ao ambiente. Essa abordagem vem sendo sugerida por diversos autores para verificar a segurança ambiental de diferentes materiais com potencialidade para uso como fertilizantes agrícolas (ANACLETO *et al.*, 2017; MAZZEO *et al.*, 2015; PANTANO *et al.*, 2021; SOMMAGGIO *et al.*, 2018).

Bioensaios realizados com sementes de alface (*Lactuca sativa*) representam uma excelente ferramenta para verificar o impacto de agentes químicos na germinação e no crescimento da planta, por ser um teste rápido, simples e com alta sensibilidade e reprodutibilidade (PRIAC; PIERRE-MARIE; CRINI, 2017).

Dentre os vegetais superiores, a espécie *Allium cepa* destaca-se pelas suas características citogenéticas apropriadas, pela facilidade de cultivo e desenvolvimento do teste, o que a torna um excelente organismo-teste para avaliações ecotoxicológicas (KURÁS *et al.*, 2006). O ensaio utilizando *A. cepa* tem sido empregado com sucesso na avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de diferentes substâncias químicas e amostras ambientais complexas

(LEME; ANGELIS; MARIN-MORALES, 2008).

A incorporação de novas substâncias ao solo pode acarretar na alteração de sua comunidade microbiana, cuja atividade pode ser avaliada por meio de ensaios de respirometria (ARAÚJO; MONTEIRO, 2006). A respiração microbiana é um bom indicador da qualidade e da saúde do solo (SPARDA *et al.*, 2017), trazendo informações importantes para a conservação deste meio.

Embora os fertilizantes vítreos de liberação lenta apresentem-se como uma solução tecnológica promissora e mais sustentável para a agricultura de precisão quando comparados aos fertilizantes tradicionalmente utilizados, principalmente em termos econômicos e ambientais, pouco se sabe sobre seus efeitos ecotoxicológicos quando aplicado aos solos. Assim, o presente estudo realizou uma avaliação ecotoxicológica de um fertilizante à base de vidros óxidos multicomponentes de liberação lenta, a fim de garantir seu uso seguro para os organismos expostos e para o ambiente.

2 Revisão da literatura

2.1 Produção agrícola e o consumo de fertilizantes no Brasil e no mundo

A produção agrícola sempre foi tópico central das preocupações humanas, pois está diretamente relacionada com os setores de desenvolvimento econômico, bem-estar e redução da pobreza (GASQUEZ *et al.*, 2012). Neste sentido, o aumento da produção de alimentos é uma das prioridades do século, pois se estima que em 2050 a população global será de 9,5 bilhões de pessoas. Entretanto, alguns países já não possuem mais território disponível e/ou viável para expansão agrícola (FREITAS; MENDONÇA, 2016). Outro ponto importante é o decréscimo de produtividade agrícola que vem sendo observado em muitas lavouras de vários países, resultante, entre outros fatores, da falta de desenvolvimento de novas tecnologias direcionadas à otimização da produção agrícola e escassez de incentivo à pesquisa (GASQUEZ *et al.*, 2012). Nesse contexto, o Brasil é considerado um dos países com maior crescimento da produtividade agropecuária do mundo, ocupando o quarto lugar como maior produtor agrícola mundial, resultado de pesquisas que permitem conhecer e explorar melhor o solo brasileiro (BENÍCIO, 2022).

Sabe-se que a utilização de fertilizantes está diretamente atrelada à uma elevada produtividade agrícola (STEWART; ROBERTS, 2012). De acordo com

Rehman *et al.* (2019), a aplicação de 1 kg de fertilizante leva a produção de até 8 kg de grãos.

No ano de 1970, o consumo de fertilizantes no Brasil foi de 958 mil toneladas, atingindo 7,77 milhões de toneladas no ano de 2002. Por esse motivo, o Brasil passou a ser um dos maiores mercados mundiais de fertilizantes (NICOLELLA; DRAGONE; BACHA, 2005). Em 2010, a importação de fertilizantes foi de 24,5 milhões de toneladas, já em 2021, o país importou cerca de 45,9 milhões de toneladas de fertilizantes, um aumento de 53,3% em relação ao ano de 2010 (BENÍCIO, 2022).

Em relação à demanda mundial por fertilizantes, de acordo com Güler (2006), em 2006, a Ásia possuía o maior consumo de fertilizantes por hectare dentre todos os continentes (150,7 kg), seguido pelos EUA (95,2 kg), Europa (76,2 kg) e Oceania (62,7 kg). Já a China, com uma grande população e pouco espaço de terra disponível, é, atualmente, a maior consumidora mundial de produtos químicos agrícolas, utilizando mais de 30% dos fertilizantes e pesticidas globais em apenas 9% da área agrícola mundial (WANG *et al.*, 2017).

A Índia apresenta uma dependência total da importação de cerca de cinco milhões de toneladas de fertilizantes potássicos, por não possuir fontes comercialmente viáveis do produto (BAHADUR; MEENA; KUMAR, 2014). Além disso, por apresentar baixas concentrações de nutrientes no solo, ocupa o segundo lugar como maior consumidora mundial de Nitrogênio e Fósforo (OLIVEIRA; MALAGOLLI; CELLA, 2019).

No Paquistão, o setor agrícola é o mais expressivo economicamente, sendo responsável por 60% do produto interno bruto do país (PIB), o que leva ao consumo de cerca de 4 milhões de toneladas de fertilizantes por ano (REHMAN *et al.*, 2019). Na África, a agricultura é um dos principais setores da economia e concentra 65% do total da força de trabalho, entretanto, o consumo de fertilizante ainda é bem abaixo dos demais continentes frente ao seu elevado custo, impedindo um crescimento agrícola mais expressivo nesta região (TONGWANE; MOELETSI, 2018).

Já os EUA são os principais consumidores mundiais de nitrato de amônio, segundo maior de sulfato de amônio e terceiro maior no consumo global de fertilizantes minerais, totalizando 8,53% da importação mundial de fertilizantes no ano de 2021 (OEC, 2021a). No continente europeu, 11,2 milhões de toneladas de fertilizantes minerais foram utilizados em 2020, seguido por 10 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados. Os principais países que mais utilizam fertilizantes na

Europa são França, Alemanha, Polônia e Espanha, que consumiram entre 1,0 e 2,1 milhões de toneladas de fertilizantes nitrogenados no ano de 2020 (EUROSTAT, 2022).

2.2 Produtores e exportadores de fertilizantes

Os principais produtores de amônia, produto chave na confecção dos fertilizantes nitrogenados são China, Rússia, Índia e EUA, que juntos compõem mais de 53% da produção mundial. Já em relação a fertilizantes potássicos, o Canadá se destaca como maior produtor de potássio, totalizando 28,4% da produção mundial, seguido pela Rússia, com 19,5% (SAAB; PAULA, 2008).

A China tem alimentado 20% da população do mundo com menos de 9% das terras aráveis disponíveis do planeta, o que impulsionou o país a se tornar o maior produtor de fertilizantes fosfatados do mundo. No entanto, a produção interna não supre a demanda do país, tornando a China também o maior consumidor de fertilizantes fosfatados (LI *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2017).

Em 2021, o maior produtor mundial de fertilizantes foi a Rússia (12,1%), seguida pela Índia (11,2%), Canadá (8,77%) e Marrocos (5,92%) (OEC, 2021b). A Rússia é um dos principais produtores e exportadores de fertilizantes nitrogenados do mundo, exportando principalmente para a União Européia e Índia, além de ser o principal exportador para o Brasil. A guerra entre Rússia e Ucrânia, iniciada em 2021, impôs limites para a Rússia, impactando o mercado global de produção e exportação de fertilizantes. A procura de fertilizantes por importadores e a consequente baixa produtividade pela falta deste insumo causou um aumento do preço dos alimentos em todo o mundo (SHAHINI, 2022).

Os dez principais países fornecedores de fertilizantes para o Brasil, no ano de 2022, estão listados na tabela 1.

Tabela 1 - Principais exportadores de fertilizantes para o Brasil, dados de janeiro a dezembro de 2022.

Países de Origem	%	Valor FOB US\$
Rússia	21,1	5,6 bilhões
Canadá	11,9	3,7 bilhões
China	15,8	2,3 bilhões
Estados Unidos	5,3	1,6 bilhões
Marrocos	4,5	1,63 bilhões
Israel	4,3	1,1 bilhões
Omã	4,1	980 milhões
Catar	3,7	910 milhões
Alemanha	3,5	899 milhões
Arábia Saudita	2,7	866 milhões
Outros Países	23,1	4,9 bilhões

Valor FOB: Valor da Mercadoria no Local de Embarque.

Fonte: ComexStat (2023).

2.3 Danos ambientais ocasionados pelos fertilizantes tradicionais

O uso de fertilizantes tradicionais acarreta em um excesso de nutrientes no solo (principalmente N), pois eles não são completamente absorvidos pelas plantas, contribuindo para um desequilíbrio ambiental, principalmente relacionados à salinização dos solos e à contaminação de águas subterrâneas e superficiais (RUDMIN *et al.*, 2019).

O nitrogênio é um dos principais nutrientes requeridos pelas culturas agrícolas, por sua baixa quantidade no solo e também por ser o elemento mais lixiviado, já que possui alta mobilidade em solo, principalmente na forma de nitrato. Contudo, grandes perdas de N no meio também decorrem pela sua transformação gasosa em NH_3 , N_2 e N_2O , que são liberados na atmosfera (CARVALHO; ZABOT, 2012). Em 2005, na China, estimou-se que 88% do N presente em fertilizantes que foram aplicados na produção agrícola foram potencialmente perdidos para o ambiente (LI *et al.*, 2014).

A transferência de N e P da agricultura para os poços d'águas da China contribuíram para uma má qualidade da água no país (BAI *et al.*, 2018). As grandes quantidades de fertilizantes fosfatados empregadas nos solos da China resultaram em águas residuais municipais contendo até 5,5% do que é consumido anualmente no país, evidenciando uma fonte de poluição (ZHOU *et al.*, 2017). A queda na qualidade da água potável tem gerado preocupação, estimulando a busca pela preservação de fontes seguras de recursos hídricos para atender o crescimento do país (BAO *et al.*,

2012).

Um dos principais problemas ocasionados pelo excesso de nutrientes lixiviados dos fertilizantes tradicionais é a eutrofização. O escoamento proveniente de terra fertilizada impulsiona o crescimento de algas e plantas nos lagos, resultando no esgotamento de oxigênio presente no corpo hídrico, o que pode levar à morte da biota aquática (AYELE; ATLABACHEW (2021). A eutrofização se tornou o principal problema dos lagos na China. Os lagos Taihu, Dianchi e Chaohu são os maiores exemplos, com alta proliferação de cianobactérias. Em 2006, as concentrações de nitrogênio e fósforo no lago Taihu chegaram, respectivamente, as concentrações de 4,3 mg/L e 0,1 mg/L (QU; FAN, 2010).

A perda de nutrientes pela aplicação de fertilizantes pode ainda contribuir para a emissão de gases como o óxido nitroso (N_2O), que favorece a intensificação do aquecimento global, por apresentar uma retenção de calor bastante elevada (cerca de 300 vezes maior do que o CO_2) (CARVALHO, 2009).

Ainda, altos níveis de sódio e potássio nos fertilizantes podem causar alterações no pH e na estrutura do solo, que levam a uma queda no rendimento e na qualidade da produtividade agrícola. Grandes quantidades de Ca, Fe e Zn impactam negativamente a absorção de nutrientes pelas plantas e ainda causam letalidade em vermes e ácaros no solo (SAVCI, 2012), alertando para efeitos deletérios em organismos não-alvos.

2.4 Materiais alternativos aos fertilizantes tradicionais

A chamada “revolução verde” trouxe consigo o termo agroecologia, muito utilizado atualmente. O termo resulta da necessidade de avanços no setor agrônomo, responsável por impactos negativos causados pela agricultura intensiva e industrializada, ocasionando, ao longo do tempo, danos aos ecossistemas (LIMA-MONCAYO; ZAMBRANO-GAVILANES, 2023).

Assim, a busca por uma alta eficiência na produção agrícola, associada à necessidade em diminuir a quantidade de fertilizante aplicado, vem se tornando uma prioridade para o setor (WANG *et al.*, 2017). Uma das possíveis alternativas para a substituição dos fertilizantes tradicionais seriam os fertilizantes de liberação lenta (WANG *et al.*, 2017). Dentre eles, estão os fertilizantes vítreos, que prometem aumentar a produtividade agrícola, diminuir os custos com a compra e aplicação de fertilizantes, além de reduzir o impacto ambiental desta atividade (HAZRA, 2016;

SAHA; DAS, 2023). Esse tipo avançado de fertilizante é feito a partir da fusão térmica de óxidos, constituído uma matriz vítrea contendo macronutrientes e micronutrientes importantes para o crescimento vegetal (SAHA; DAS, 2023; SAYED; OUIS, 2022). A grande vantagem desses fertilizantes está em garantir nutrição às plantas lentamente, de modo que a liberação dos nutrientes aconteça em taxas equivalentes de acordo com a necessidade e o estágio de desenvolvimento das culturas (LABBILTA *et al.*, 2021a).

A aplicação de fertilizantes vítreos no cultivo de trigo (*Triticum durum* L.) mostrou-se bastante vantajosa. Após quatro meses de uso, foi verificado um aumento significativo em termos de crescimento, atividade fotossintética e rendimento quando comparado com o cultivo que recebeu aplicação de NPK e o controle, evidenciando seu elevado potencial fertilizante (LABBILTA *et al.*, 2021b).

Estudos com fertilizantes a base de glauconita, considerado um fertilizante de liberação lenta, verificaram que eles apresentam capacidade de disponibilizar concentrações ideais de K, P, Ca e Mg em culturas agrícolas, mostrando-se favorável às plantas, ao solo e ao ambiente (RUDMIN *et al.*, 2019). Fertilizantes microencapsulados à base de quitosana mostraram-se eficientes na liberação de nutrientes para as plantas, correlacionando a capacidade de difusão de nutrientes com a biodegradação do material (ANGELO; FRANÇA; FAEZ, 2021).

Outra opção ambientalmente sustentável a ser explorada é o uso de biofertilizantes, que contém microrganismos que promovem o crescimento de plantas ao liberar nutrientes minerais e substâncias promotoras de crescimento, por meio da fixação de nitrogênio e solubilização de fósforo, potássio e zinco, além de suprimir indiretamente os patógenos das plantas (BAHADUR; MEENA; KUMAR, 2014).

A substituição gradativa dos fertilizantes tradicionais é uma tendência mundial na tentativa de mitigar os danos ambientais e promover a sustentabilidade agrícola (BAHADUR; MEENA; KUMAR, 2014).

2.5 Ensaios ecotoxicológicos

As principais fontes de poluição ambiental são provenientes de atividade industrial, mineração, fundição e agricultura, na qual está incluído o uso de agrotóxicos e fertilizantes fosfatados (ALI; KHAN; ILAHI, 2019). A Ecotoxicologia é um campo da ciência que avalia a ação de contaminantes sobre o ecossistema, analisando as alterações causadas sobre os organismos em níveis moleculares,

celulares, fisiológicos, comportamentais, individuais e ecológicos (BEKETOV; LIESS, 2012). Os organismos podem ser expostos à contaminação ambiental de diferentes formas, incluindo ingestão, inalação e absorção, ampliando a diversidade de testes e *endpoints* a serem estudados (ALI; KHAN; ILAHI, 2019). Desde a década de 80, o Brasil tem realizado testes de toxicidade para avaliações ambientais com a finalidade de estudar os efeitos causados pelos poluentes (BERTI *et al.*, 2009).

Estudos ecotoxicológicos auxiliam também em medidas para prevenir e remediar possíveis contaminações, que podem ser classificadas em exposição aguda (exposição única ou regular), resultando em efeitos imediatos, ou exposição crônica (exposição contínua ao longo do tempo), gerando efeitos que se manifestam lentamente ao longo do tempo (CARVALHO; PIVOTO, 2011). As informações sobre toxicidade de um novo produto são provenientes de diversos resultados, desde a iniciação molecular até eventos de interação química com organismos. A Ecotoxicologia é fundamental para a análise de novas substâncias, tendo por objetivo a proteção do ambiente e a prevenção da poluição ambiental, fatores que já se sabe, estão cada vez mais integrados nos índices de saúde humana (BROOKS, 2019).

A exposição de vegetais tem papel essencial em estudos ecotoxicológicos, tendo em vista que muitos contaminantes atingem esses organismos, que são os primeiros do processo trófico. Desse modo, quando a contaminação atinge inicialmente as plantas, substâncias tóxicas podem atingir outros seres vivos através da cadeia alimentar, por um processo conhecido como magnificação trófica (CESCHIN; BELLINI; SCALICI, 2020).

2.5.1 Fitotoxicidade

A análise de fitotoxicidade é uma ferramenta essencial para estimar os danos causados por poluentes tóxicos em ambientes terrestres e aquáticos, sendo os testes de germinação os mais utilizados por sua simplicidade, rapidez, baixo custo e confiabilidade (LOURENÇO *et al.*, 2020; PRIMO *et al.*, 2020).

A espécie *Lactuca sativa* é uma das mais utilizadas para avaliação de fitotoxicidade por apresentar maior sensibilidade ao estresse ambiental causado por substâncias tóxicas do que outros organismos (PRIMO *et al.*, 2020). Além de ser um vegetal importante para a alimentação, a alface é uma planta cultivada no mundo todo e considerada um vegetal padrão para testes de toxicidade (SILVA; MATOS, 2016). A taxa de germinação das sementes e o comprimento da radícula e do hipocótilo são os

principais parâmetros analisados nos testes com *L. sativa* visando à avaliação da toxicidade ambiental (PRIAC; BADOT; CRINI, 2017).

2.5.2 Citogenotoxicidade

Efeitos citotóxicos e genotóxicos causados por poluentes ambientais vêm sendo motivo de preocupação há anos. A citotoxicidade é caracterizada por agentes capazes de causar alterações nas células de um organismo, podendo resultar em alterações na divisão celular e/ou morte celular. Já a genotoxicidade é a capacidade de um poluente causar alterações no DNA, que podem ainda ser classificadas como mutagênicas, quando essas alterações genéticas acarretam em um efeito irreversível ao organismo, com potencial de ser transmitido por hereditariedade (MACAR, 2020). Estudos de citogenotoxicidade avaliam o número de aberrações cromossômicas, como quebra nas cromátides, pontes anafásicas, formação de micronúcleo e alterações no processo de divisão celular (LESSA; SILVA; CARIELLO, 2017; MACAR, 2020).

O teste com *Allium cepa* é muito utilizado para essas avaliações, por ser um método de baixo custo e de elevada reprodutibilidade. Além disso, este organismo-teste possibilita a avaliação da presença de micronúcleos (MN) e aberrações cromossômicas (AC) de modo simples, rápido e confiável. Adicionalmente, também permite a verificação de variações no índice mitótico (MI), que é utilizado para avaliar as alterações e interrupções no ciclo de divisão celular (MACAR, 2020).

Ensaio com aberrações cromossômicas (AC) e alterações nucleares (AN), realizados com *Allium cepa* são eficientes para avaliar possíveis efeitos citogenotóxicos e mutagênicos de contaminantes ambientais, além de apresentarem características citogenéticas vantajosas, como cromossomos grandes e em número reduzido ($2n = 16$) (HARA; MARIN-MORALES, 2017; GONÇALVES *et al.*, 2020). Dessa forma, torna-se possível a realização de estudos que avaliem a citotoxicidade e genotoxicidade, uma vez que possibilitam a detecção de efeitos citogenotóxicos (COELHO *et al.*, 2017).

2.5.3 Respiração do solo

A RBS ou respiração basal do solo é um parâmetro utilizado para analisar a atividade microbiana a partir do fluxo de oxigênio e gás carbônico no sistema, fatores que se alteram frente à presença de compostos tóxicos e alteração de nutrientes

limitantes, como nitrogênio (PITOMBO *et al.*, 2018). Solos férteis e com elevada diversidade microbiana tendem a apresentar maior produção de CO₂ (ARAÚJO; MONTEIRO, 2006).

Um dos métodos mais utilizados para avaliar alterações na taxa de respiração do solo é o ensaio respirométrico de Bartha. O respirômetro de Bartha constitui-se de um sistema formado por uma câmara onde ocorre a biodegradação do solo por microrganismos e, conseqüentemente, a produção de CO₂, o qual é transferido para uma segunda câmara, onde é dissolvido em solução de hidróxido de potássio. Dessa forma, a produção de gás carbônico é quantificada, evidenciando o comportamento microbiano (MELLO *et al.*, 2007; PITOMBO *et al.*, 2018).

3 Objetivos

Frente à necessidade iminente no desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis, que garantam uma elevada produção, um alimento de alta qualidade e uma diminuição dos impactos ambientais, a realização do presente trabalho buscou avaliar o potencial ecotoxicológico de um fertilizante vítreo multicomponente. Embora tal material atenda às novas exigências da agricultura moderna, o mesmo precisa ser testado quanto à sua segurança toxicológica, antes de sua comercialização. Desse modo, este trabalho teve como objetivos:

- investigar seu potencial fitotóxico a partir da realização de ensaios de germinação e crescimento de hipocótilo e raiz em *L. sativa*;
- avaliar o seu potencial citogenotóxico em células meristemáticas do organismo-teste *A. cepa*;
- monitorar a atividade microbiana por meio de ensaios de respirometria, a fim de se verificar a interferência do produto, em suas diferentes composições, sobre a qualidade do solo;
- avaliar possíveis alterações na biomassa microbiana em decorrência da aplicação do fertilizante vítreo;
- comprovar a segurança do produto a partir da análise dos resultados combinados, em soluções aquosas e em solo, para promover o desenvolvimento de uma agricultura ambientalmente sustentável;

- fornecer informações complementares que possibilitem uma melhor compreensão sobre o impacto ambiental da aplicação deste fertilizante vítreo, identificando possíveis efeitos deletérios para os organismos e o ambiente.

4 Material e métodos

O material testado refere-se a um vidro óxido multicomponente obtido pelo método tradicional de fusão-resfriamento, classificado como fertilizante vítreo de liberação lenta (Figura 1). Este material foi sintetizado pelo grupo do Prof. Dr. Danilo Manzani do Instituto de Química de São Carlos (IQSC-USP) e cedido para a realização das análises ecotoxicológicas propostas. O mesmo encontra-se devidamente caracterizado quanto aos seus aspectos químicos e estruturais em Moura (2019).



Figura 1 - Fertilizante vítreo multicomponente.

Características referentes ao preparo das amostras, bem como os métodos empregados na avaliação ecotoxicológica estão descritos, em detalhes, nos dois artigos apresentados na seção a seguir.

5 Resultados e discussão

Os resultados do presente trabalho estão apresentados na forma de dois artigos:

Artigo 1: Avaliação fitotóxica e citogenotóxica de fertilizante a base de vidros óxidos multicomponentes, visando à agricultura sustentável

Artigo 2: Análise ecotoxicológica de fertilizantes a base de vidros óxidos multicomponentes aplicados em solo: uma alternativa sustentável para a agricultura

5.1 Avaliação fitotóxica e citogenotóxica de fertilizante a base de vidros óxidos multicomponentes, visando à agricultura sustentável

Thomaz William Boaventura¹, José Hermes da Silva Soares², Ana Rita de Araujo Nogueira³, Alberto Carlos de Campos Bernardi³, Danilo Manzani⁴, Dânia Elisa Christofoletti Mazzeo⁵

¹ Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular, Molecular e Microbiologia, Universidade Estadual de São Paulo - Rio Claro, SP (Brasil);

² Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade de São Paulo - São Carlos, SP

³ Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

⁴ Departamento de Química e Física Molecular, IQ, Universidade de São Paulo - São Carlos, SP

⁵ Departamento Biotecnologia e Produção Vegetal e Animal, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos - Araras, SP

Resumo

O uso de fertilizantes tradicionais para aumentar a produtividade agrícola e, assim, atender à crescente demanda por alimentos vem acarretando graves problemas ambientais, incluindo salinização, aquecimento global, eutrofização, letalidade da biota, acidificação e outros efeitos prejudiciais devido ao acúmulo de nutrientes no solo. Frente a esse cenário, a utilização de fertilizantes vítreos pode vir como uma solução para esses problemas por garantir a liberação progressiva de nutrientes e apresentar alta versatilidade composicional, atendendo a demanda fisiológica das plantas. Contudo, pouco se conhece sobre o potencial ecotoxicológico desses novos fertilizantes. Assim, para contribuir com informações sobre sua segurança ambiental, o presente estudo buscou avaliar os efeitos ecotoxicológicos de um fertilizante vítreo óxido multicomponente, de liberação lenta, sobre os organismos-testes *Lactuca sativa* e *Allium cepa*, para analisar seu potencial fitotóxico e citogenotóxico, respectivamente. O fertilizante foi testado em cinco diferentes concentrações (C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L), dissolvendo o material em água, com agitação constante, por 24 h, 48 h, 72 h, 120 h e 144 h. A análise química mostrou que os nutrientes foram liberados de forma gradual, ou seja, a concentração deles aumentou progressivamente à medida que o tempo de solubilização aumentou. A partir do índice de germinação, foi possível observar que a C1 foi a única concentração considerada como não fitotóxica em todos os tempos de solubilização testados. Contudo, o fertilizante não causou alterações no índice mitótico de *A. cepa*, sendo classificado como genotóxico apenas na concentração mais alta (C5) e no maior

tempo de liberação (144 h). Desse modo, tais resultados demonstram um elevado potencial de aplicabilidade do fertilizante vítreo testado, especialmente do ponto de vista ambiental, desde que seja estabelecida uma concentração ideal de uso específica para cada cultura.

Palavras-chave: Fertilizante vítreo; fertilizante de liberação lenta; ecotoxicidade; *Lactuca sativa*; *Allium cepa*

Abstract

The use of traditional fertilizers to increase agricultural productivity and thus meet the growing demand for food has caused serious environmental problems, including salinization, global warming, eutrophication, biota lethality, acidification and other harmful effects due to the accumulation of nutrients in the soil. Faced with this scenario, the use of glass fertilizers can come as a solution to these problems by ensuring the progressive release of nutrients and presenting high compositional versatility, reaching the physiological demands of plants. However, little is known about the ecotoxicological potential of these new fertilizers. Therefore, this study aimed to assess the environmental safety of a multi-component, slow-release vitreous oxide fertilizer by examining its potential phytotoxic and cytogenotoxic effects on test organisms *Lactuca sativa* and *Allium cepa*, respectively, in order to provide valuable information on its ecological impact. The fertilizer was tested at five different concentrations (C1: 0.317 g/L; C2: 0.633 g/L; C3: 1.267 g/L; C4: 2.534 g/L; C5: 5.063 g/L), dissolving the material in water, with constant stirring, for 24 h, 48 h, 72 h, 120 h and 144 h. The chemical analysis revealed a gradual release of nutrients, meaning that their concentration increased progressively with longer solubilization times. The germination index results indicated that C1 was the only concentration considered as non-phytotoxic among all solubilization times tested. However, the fertilizer did not change the mitotic index of *A. cepa*, being classified as genotoxic only at the highest concentration (C5) and at the longest release time (144 h). Therefore, such results demonstrate a high applicability potential of the tested glass fertilizer, especially from an environmental point of view, as long as an ideal specific use concentration is established for each crop.

Keywords: Glass fertilizer; slow-release fertilizer; ecotoxicity; *Lactuca sativa*; *Allium cepa*

1 Introdução

A agricultura destaca-se em todo mundo pelo seu potencial econômico, geração de empregos e alta capacidade de produção em um cenário de demanda crescente de alimentos (MARCELINO; SVERZUTI; TRIZOLIO, 2020). A produtividade agrícola está diretamente atrelada ao emprego de fertilizantes, os quais corrigem as deficiências nutricionais do solo, fornecendo os minerais necessários para o crescimento da cultura (HEBE BRAND; LABORDE, 2023). Segundo Chandinil *et al.* (2019), mais de 70% da produção de grãos mundial é dependente do emprego de fertilizantes.

Contudo, os fertilizantes tradicionalmente utilizados na agricultura, geralmente aplicados em níveis excessivos, causam efeitos negativos ao ambiente, pelo acúmulo de nutrientes no solo, que podem intensificar os efeitos das mudanças climáticas e, ainda, ser lixiviados para águas subterrâneas, levando à eutrofização de corpos hídricos, o que prejudica a qualidade da água e o tratamento da água potável (BENLAMLH, 2021).

Em meados de 1970, a preocupação com a questão ambiental surgiu com a possibilidade de o planeta não suportar as necessidades crescentes das futuras gerações, buscando, a partir de então, soluções para as atividades que degradam o planeta (WEBER; SILVA, 2020). Essa crescente discussão entre preservação ambiental inclui, principalmente, os efeitos do agronegócio. Questões importantes sobre a manutenção de recursos naturais estão sendo levantadas, como a utilização sustentável de recursos como a água e o solo e a necessidade de criar novas tecnologias a fim de reduzir os impactos causados por atividades agrícolas como, por exemplo, o uso de fertilizantes convencionais (SATO, 2021).

Assim, novas alternativas que busquem o aumento da produtividade agrícola, porém de forma ambientalmente sustentável vem sendo requeridas (SARKADI, 2019). Neste sentido, os fertilizantes de nova geração podem potencializar a produção de alimentos e diminuir o impacto ao ambiente, sendo considerados ecologicamente corretos (SELEIMAN *et al.*, 2021). Dentre eles, os fertilizantes vítreos tem como objetivo otimizar a liberação de nutrientes para que esta aconteça de maneira lenta, evitando o acúmulo de nutrientes no solo e os desdobramentos ambientais dessa prática (SAYED; OUIS, 2022). Adicionalmente, os fertilizantes vítreos apresentam como importantes vantagens sua versatilidade composicional e a liberação de

nutrientes em taxas equivalentes à necessidade e o estágio de desenvolvimento das culturas (LABBILTA *et al.*, 2021a).

Neste contexto, é de suma importância adquirir conhecimento acerca da toxicidade dos fertilizantes vítreos, visando implementar medidas preventivas para mitigar problemas ambientais e aprimorar a legislação relacionada ao controle e uso desses compostos químicos (SIMPLÍCIO, 2015). Desse modo, testes ecotoxicológicos representam métodos rápidos e acessíveis, desempenhando um papel crucial na avaliação dos efeitos prejudiciais das atividades humanas nos ecossistemas. Sua utilização é recomendada como ferramenta adicional para superar limitações e realizar uma avaliação mais completa dos riscos ecológicos em solos e outras matrizes (BLÁHA; HOFMAN, 2020).

Motivado pelo impacto ambiental causado pelos fertilizantes tradicionais e a alta demanda deste insumo agrícola no cenário mundial, o presente estudo buscou analisar possíveis efeitos ecotoxicológicos causados pela aplicação de vidros óxidos multicomponentes como fertilizantes a fim de promover uma agricultura ambientalmente sustentável. Este estudo vai ao encontro com os objetivos de desenvolvimento sustentável incentivados pela ONU, especialmente o que prioriza o combate à fome e agricultura sustentável. Com a finalidade de verificar a segurança ambiental deste fertilizante de nova geração, o potencial fitotóxico e a ação citogenotóxica do fertilizante vítreo solubilizado em água em cinco diferentes concentrações e tempos de diluição, foram avaliados utilizando os bioensaios de *Lactuca sativa* e *Allium cepa*, respectivamente.

2 Material e métodos

2.1 Fertilizante vítreo

O material testado refere-se a um vidro óxido multicomponente obtido pelo método tradicional de fusão-resfriamento, apresentando uma faixa granulométrica entre 1 e 2 mm. O material passou por estudos de síntese e solubilidade previamente, evidenciando a possibilidade e a potencialidade de utilizar estes vidros óxidos multicomponentes como fertilizantes (MOURA, 2019). A composição de sua matriz confere alta solubilidade em água, de modo que a dissolução dos componentes do vidro ocorre de modo a otimizar a liberação e a absorção dos nutrientes pelas plantas.

A alta versatilidade composicional da matriz vítrea (FERREIRA; ZANOTTO;

SCUDELLER, 2002), permitiu incluir diferentes micro e macronutrientes em sua composição, a qual está apresentada na tabela 1.

Tabela 1 - Reagentes e respectivas porcentagens das massas utilizadas na síntese do vidro multicomponente padrão.

Reagente	Porcentagem (%)	Produtos finais
K_2CO_3 (Carbonato de Potássio)	9,02	Potássio (K)
$CaCO_3$ (Carbonato de Cálcio)	13,01	Cálcio (Ca)
$NH_4H_2PO_4$ (Di-hidrogenofosfato de Amônio)	63,80	Fósforo (P)
B_2O_3 (Óxido de Boro)	1,36	Boro (B)
SiO_2 (Dióxido de Silício)	5,87	Silício (Si)
$MgCO_3$ (Carbonato de Magnésio)	2,74	Magnésio (Mg)
MnO_2 (Dióxido de Manganês)	0,56	Manganês (Mn)
MoO_3 (Trióxido de Molibdênio)	0,46	Molibdênio (Mo)
ZnO (Óxido de Zinco)	3,18	Zinco (Zn)

FONTE: Adaptado de Moura (2019).

2.2 Preparo dos extratos aquosos

Foram preparados cinco 5 extratos, obtidos a partir da pesagem do fertilizante vítreo, seguido por solubilização em água ultrapura, obtendo as seguintes concentrações: 0,317 g/L, 0,633 g/L, 1,267 g/L, 2,534 g/L e 5,063 g/L. Essas concentrações foram escolhidas baseadas na dose de aplicação em campo (as três primeiras) para o cultivo de *Brachiaria* e duas progressivamente maiores. As amostras

foram colocadas em *shaker* com agitação orbital a 240 rpm (modelo MA 410/VF, Marconi), sem controle de temperatura, nos períodos de 24h, 48h, 72h, 120h e 144h. Uma vez que a dissolução do fertilizante vítreo é gradual, decorridos esses períodos de solubilização, cada amostra foi filtrada com o auxílio de funil e papel de filtro para remoção do fertilizante vítreo não dissolvido, e então, avaliada por ensaios ecotoxicológicos. Os cinco tempos de liberação foram escolhidos para demonstrar a potencialidade de liberação lenta de seus minerais constituintes e analisar o possível impacto da liberação otimizada gradual dos nutrientes presentes em meios mais e menos concentrados.

2.3 Análise química por ICP OES (*Inductively coupled plasma optical emission spectrometry* - Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado)

A fim de se conhecer a exata concentração de cada componente químico liberado após cada período de solubilização em água, as amostras foram analisadas por ICP OES. Essas análises foram realizadas em parceria com o grupo da Dra. Ana Rita de Araujo Nogueira, da Embrapa Pecuária Sudeste (São Carlos - SP).

A preparação das amostras e as condições de operação do equipamento (ICP OES 5100, *Agilent Technologies*, Mulgrave, Australia) para a realização da análise seguiram os procedimentos descritos em Machado *et al.* (2020).

2.4 Avaliação ecotoxicológica

2.4.1 Ensaio de fitotoxicidade com *Lactuca sativa*

Este ensaio foi realizado seguindo as diretrizes propostas no guia de efeitos ecológicos da USEPA (1996). Para isso, 20 sementes de *L. sativa* (variedade Wanda) foram uniformemente dispostas em placas de Petri individuais contendo 4 mL dos diferentes extratos aquosos (0,317 g/L, 0,633 g/L, 1,267 g/L, 2,534 g/L e 5,063 g/L do fertilizante) e nos diferentes tempo de solubilização (24 h, 48 h, 72 h, 120 h e 144 h). O controle negativo (CN) foi realizado com água ultrapura. Para o controle positivo (CP), foi utilizado sulfato de zinco heptahidratado (0,05 M - $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). A seguir, as placas foram incubadas em BOD, na ausência de luz, por um período de 120h (cinco dias), a uma temperatura de 22 ± 2 °C. O experimento foi realizado em triplicata. Decorrido esse período, foi contabilizado o número de sementes germinadas, considerando apenas aquelas que apresentaram um comprimento de radícula superior

à 5 mm. Além disso, também foi mensurado o comprimento do hipocótilo e da radícula de cada uma das sementes germinadas, com o auxílio de um paquímetro digital. A avaliação do potencial fitotóxico do fertilizante foi feita com base nos resultados obtidos para a Germinação Relativa (GR), Crescimento Relativo (CR) e Índice de Germinação (IG). Esses parâmetros foram calculados por meio das equações propostas por Tiquia (2010), descritas a seguir:

$$\text{GR (\%)} = \frac{\text{Nº de sementes germinadas amostra}}{\text{Nº de sementes germinadas controle}} \times 100$$

$$\text{CR (\%)} = \frac{\text{Média do crescimento das raízes amostra}}{\text{Média do crescimento das raízes controle}} \times 100$$

$$\text{IG (\%)} = \frac{(\% \text{ de sementes germinadas}) \times (\% \text{ crescimento radicular})}{100}$$

Adicionalmente, seguindo a classificação sugerida por Gonçalves *et al.* (2020), as diferentes concentrações foram consideradas como não tóxicas (IG > 80%); moderadamente tóxicas (IG entre 30 e 80%); e altamente tóxicas (IG < 30%), refletindo sobre a viabilidade de uso agrícola do fertilizante em termos de segurança ambiental.

Os valores de todos os parâmetros obtidos foram analisados estatisticamente por meio do teste Kruskal Wallis, a 0,05 de nível de significância, utilizando o programa BioEstat 5.1.

2.4.2 Ensaio de citogenotoxicidade com *Allium cepa*

Para este ensaio, 50 sementes de *A. cepa* (variedade Híbrida Diamantina) foram uniformemente dispostas em placas de Petri individuais contendo papel filtro e 4 mL de um dos cinco extratos aquosos e nos cinco tempos de solubilização testados. O controle negativo (CN) foi realizado com água ultrapura e o controle positivo (CP) com metil-metano sulfonato a 10 mg/L (MMS, Sigma-Aldrich, CAS 66-27-3). A seguir, as placas foram incubadas em BOD, por um período de 120h (cinco dias), a uma temperatura de 22 ± 2 °C. O experimento foi realizado em triplicata. Decorrido esse período, as radículas foram coletadas e fixadas em Carnoy I (etanol: ácido acético glacial, 3:1, v/v), por um período de 6 horas. Posteriormente, foi realizada a troca por

um novo fixador, para posterior armazenamento a 4 °C, até a utilização deste material no preparo das lâminas. O teste de citogenotoxicidade, realizado com células meristemáticas de *A. cepa*, seguiu o protocolo estabelecido por Grant (1982), com algumas modificações. As raízes, previamente fixadas, passaram por banho em água destilada, para a retirada do excesso do fixador. Então, seguiram para hidrólise ácida com HCl (ácido clorídrico) 1 N, realizada em banho a 60 °C por 10 minutos, sendo posteriormente, submetidas à reação de Feulgen por 2h, para coloração do DNA. Em seguida, as radículas coradas foram lavadas em banhos consecutivos de água destilada, até a retirada do excesso do corante. Na sequência, a região meristemática foi disposta em lâmina para microscopia, juntamente com uma gota de carmim acético (2%), e recoberta com lamínula. Então, o meristema foi suavemente macerado para o espalhamento das células. As lamínulas foram retiradas em nitrogênio líquido e as lâminas permanentes finalizadas com resina sintética, para serem, posteriormente, analisadas em microscópio de luz, em aumentos de 400X e 1000X.

Para análise das lâminas, foram considerados diferentes tipos de alterações cromossômicas e nucleares, como: perdas, quebras e pontes cromossômicas, C-metáfase, micronúcleos, brotos nucleares, entre outros, observados durante o ciclo celular (interfase, prófase, metáfase, anáfase, telófase) e serviram como parâmetro de genotoxicidade (IGe). Já o índice mitótico (IM), constituiu o parâmetro de citotoxicidade das amostras. Esses índices foram calculados por meio das seguintes equações:

$$\text{IM (\%)} = \frac{\text{Nº de células em divisão}}{\text{Nº total de células analisadas}} \times 100$$

$$\text{IGe (\%)} = \frac{\text{Nº de alterações cromossômicas e nucleares}}{\text{Nº total de células analisadas}} \times 100$$

Os parâmetros anteriormente citados foram obtidos pela contagem de cerca de 500 células por lâmina, para um total de 4 lâminas por placa, totalizando 12 lâminas por tratamento. As análises estatísticas foram realizadas pelo teste de Kruskal Wallis ($p < 0,05$), utilizando o programa estatístico BioEstat 5.1.

3 Resultados e discussão

3.1 Análise química dos minerais liberados por solubilização

A exata concentração de cada componente químico liberado após cada um dos períodos de solubilização em água, nas diferentes concentrações, está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantificação dos nutrientes liberados por solubilização do fertilizante vítreo em água, analisado por ICP OES.

Amostra		Concentração (mg L ⁻¹)							
		Ca	K	Mg	Mn	Mo	P	Si	Zn
24h	C1	15,2	44,4	4,2	0,25	0,16	7,9	2,5	2
	C2	7,1	43,3	2,4	0,25	0,19	11,7	2,8	2,5
	C3	9,5	46,9	2,7	0,39	0,37	26,8	4	4,3
	C4	15,2	52	3,4	0,63	0,67	53,7	6,4	7,6
	C5	41,7	68,1	6	1,52	1,8	147	13,8	19,3
48h	C1	9,5	45,5	2,5	0,29	0,2	15,8	3	3
	C2	10	47,8	2,8	0,42	0,38	30,6	3,9	4,7
	C3	21,6	58,1	4,3	0,94	1,11	88	8,7	11,8
	C4	42,7	78,6	7,1	1,95	2,41	188	16,8	23,8
	C5	115	122	13,3	3,97	4,89	369	30,9	44,6
72h	C1	8,6	49,2	2,6	0,35	0,34	22,6	3,2	3,8
	C2	15,7	54,2	3,4	0,61	0,69	53,2	5,9	7,4
	C3	25,9	63,8	4,9	1,13	1,33	109	10,2	14,2
	C4	53,7	90,8	8,6	2,46	3,08	242	20,6	30
	C5	111	153	17	5,35	6,35	496	40,4	63,6
120h	C1	9,8	52,8	2,7	0,39	0,43	28,2	3,6	4,4
	C2	18,2	58,5	3,7	0,75	0,9	71,2	7,2	9,4
	C3	36,4	72,9	5,9	1,54	1,84	155	13,5	19,7
	C4	76,9	115	11,5	3,5	4,42	348	28,2	42,9
	C5	161	215	24,2	8,02	9,32	717	57	90,3
144h	C1	12,8	56,4	3	0,49	0,53	40,3	4,7	5,9
	C2	22,4	63	4,3	0,93	1,1	91,5	8,7	12
	C3	45,4	82,9	7,3	2,02	2,54	206	17,5	25,3
	C4	105	142	16,7	5,22	6,34	473	38,7	59,6
	C5	212	271	37	11,76	13,37	956	75,4	130

Ca: Cálcio; K: Potássio; Mg: Magnésio; Mn: Manganês; Mo: Molibdênio; P: Fósforo; Si: Silício; Zn: Zinco; C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L.

Além da facilidade de incorporação de nutrientes específicos em sua composição, os fertilizantes vítreos possuem ainda a vantagem de apresentar uma liberação lenta desses nutrientes de acordo com a necessidade nutricional da planta (LABBILTA *et al.*, 2021b). Considerando os resultados apresentados anteriormente, nota-se que o fertilizante foi eficiente em seu propósito de liberação lenta dos nutrientes, aumentando gradativamente a liberação da maioria dos nutrientes conforme o tempo de diluição, de modo que quanto maior o tempo de solubilização, maior a concentração dos nutrientes.

Essa solubilização gradual de nutrientes foi mais notável em K, P, Si e Zn, que aumentaram proporcionalmente com o aumento das concentrações e dos tempos de liberação. Em um estudo realizado com cultivo de cana-de-açúcar, a aplicação de Si combinado com P e K foi associada diretamente ao aumento da produtividade do cultivo, além de ampliação na concentração de nutrientes como Si, N, Zn e B nas células das folhas (NICCHIO *et al.*, 2021), demonstrando a importância desses elementos para as plantas.

A dissolução da rede do vidro em solução aquosa ocorre por reações de hidratação e hidrólise. A primeira envolve a troca iônica entre íons móveis presentes na matriz vítrea (K^+ , Ca^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} e Zn^{2+}) e os íons H^+ da solução e a segunda leva à quebra das ligações P - O - P ou Si - O - Si na superfície hidratada, que passam para a solução em diferentes comprimentos (ERSUNDU; KUZU; ERSUNDU, 2022).

A figura 1 mostra a relação de liberação dos nutrientes do fertilizante vítreo por concentração para o tempo de 144h, evidenciando a elevada quantidade de P liberada. Assim como o Si, o P atua como um componente formador da matriz vítrea, porém, adicionalmente, o P também é um macronutriente vital para a planta, o que torna os fertilizantes vítreos de fosfato bastante vantajosos (HAZRA; DAS, 2014). O P é o segundo nutriente mais importante para as culturas, sendo necessário nos processos de respiração, armazenamento de energia, fotossíntese, fixação de nitrogênio, divisão e aumento celular, formação das membranas celulares, sendo requerido em todas as fases do desenvolvimento vegetal, da germinação das sementes ao desenvolvimento de flores e frutos (MAHARAJAN *et al.*, 2018; MUINDI, 2019). Apenas 30% das áreas cultiváveis no mundo apresentam concentrações ideais de P, sendo que na maioria dos solos a disponibilidade de P é de apenas $\sim 1 \mu\text{mol/L}$, enquanto a concentração ótima para a produtividade das culturas seria cerca de 30 vezes mais ($\sim 30 \mu\text{mol/L}$) (ADHYA *et al.*, 2015; KIRKBY; JOHNSTON, 2008). Desse

modo, pela sua elevada capacidade na liberação desse elemento, o fertilizante vítreo aqui estudado apresenta um alto potencial de aplicação.

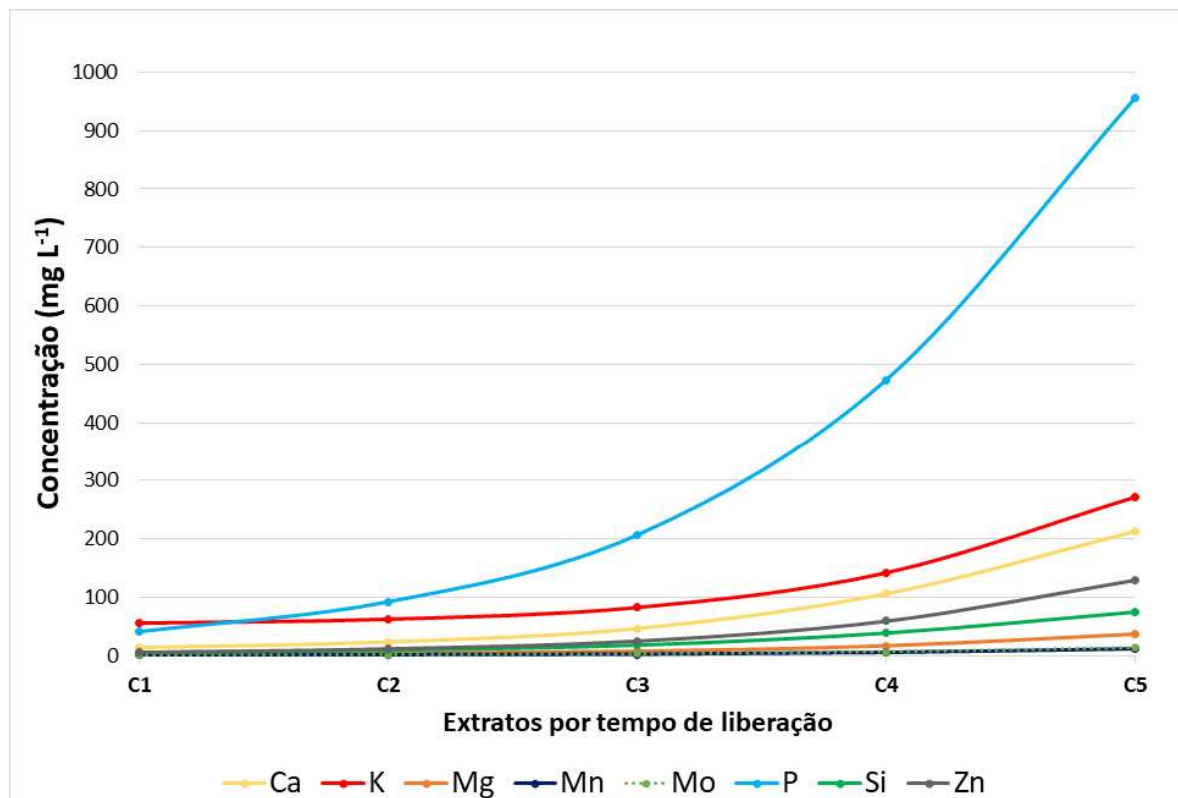


Figura 1. Resultado da liberação dos nutrientes do fertilizante a partir da análise por ICP OES no tempo de 144h de liberação. Ca: Cálcio; K: Potássio; Mg: Magnésio; Mn: Manganês; Mo: Molibdênio; P: Fósforo; Si: Silício; Zn: Zinco.

O segundo elemento mais liberado pelo fertilizante vítreo em solução aquosa foi o K. Este macronutriente é um dos mais requeridos pelas plantas pois atua diretamente no seu metabolismo e fisiologia, controlando o crescimento das células, o transporte de água, nutrientes e metabólitos pelo xilema/floema, a formação de madeira e as respostas a estresses bióticos e abióticos (SARDANS; PEÑUELAS, 2021). Contudo, apesar de existirem grandes reservas de K no solo, apenas 1 a 2% desse montante encontra-se na forma solúvel ou trocável, que são as formas assimiláveis pelas plantas, o que requer o emprego de fertilizantes potássicos para sua suplementação (YAHAYA *et al.*, 2023). Desse modo, a presença desse nutriente no fertilizante vítreo avaliado em concentrações graduais e crescentes sustenta o potencial de utilização deste produto.

Adicionalmente, o emprego intensivo dos fertilizantes convencionais, para garantir a produtividade das culturas, tem ocasionado sérios problemas ambientais incluindo excesso de nutrientes e salinidade no solo, eutrofização de corpos hídricos e liberação de gases do efeito estufa (RASHIMI *et al.*, 2020). De acordo com Chandini *et al.* (2019), a lixiviação do fosfato de solos agrícolas pelo intenso uso de fertilizantes potássicos é o principal motivo de eutrofização das águas. Ainda, segundo esses mesmos autores, uma das possíveis soluções para diminuir o impacto causado pelo uso de fertilizantes, seria a sua substituição por fertilizantes de liberação lenta, como o avaliado no presente estudo.

O terceiro elemento com maior concentração quantificado no extrato aquoso foi o Ca, também considerado um macronutriente. O Ca é um importante regulador do crescimento e desenvolvimento de plantas, apresentando papel central na formação da parede celular e no aumento da permeabilidade da membrana plasmática (HEPLER, 2005).

Em relação à análise de pH das amostras, observa-se uma acidificação no meio, que aumenta conforme o aumento das concentrações e dos tempos de liberação (Tabela 3). Essa acidificação também foi observada por Moura (2019), correlacionando a queda do pH com a formação de compostos ácidos. Contudo, essa acidificação pronunciada observada nos extratos aquosos em situação otimizada de laboratório, dificilmente ocorreria em condições naturais. Segundo Cecagno *et al.* (2019), a adubação utilizando fertilizantes nitrogenados com uréia aumentou a acidez no solo até uma profundidade de 20 cm, entretanto, quantidades moderadas de aplicação mantiveram a acidez do solo semelhante às áreas de controle. Ainda, mesmo com a adição de compostos ácidos ou básicos, o pH do solo pode se manter inalterado devido à capacidade tamponante do solo, desde que incorporados em pequenas quantidades (NG *et al.*, 2022).

Tabela 3 – Valores de pH das amostras solubilizadas nas cinco concentrações e tempos de solubilização.

	24h	48h	72h	120h	144h
C1	5,61	4,2	3,94	3,65	3,57
C2	5,1	3,97	3,6	3,47	3,43
C3	4,15	3,72	3,33	3,22	3,22
C4	3,71	3,29	3,15	3,13	3,1
C5	3,3	3,12	3	3,01	3,01

C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L.

3.2 Teste de fitotoxicidade com *Lactuca sativa*

Os resultados referentes à avaliação da toxicidade aguda do fertilizante vítreo dissolvido em água estão apresentados na tabela 4 e figura 2. A taxa de germinação (germinação relativa) não foi afetada por nenhuma das concentrações e em nenhum dos períodos avaliados, mantendo-se sempre superior a 95% (Tabela 4).

Tabela 4 – Taxa de germinação relativa (%) de sementes de *L. sativa* expostas às amostras solubilizadas do fertilizante vítreo.

		24h	48h	72h	120h	144h
Germinação Relativa (%)	CN	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0
	C1	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0
	C2	100,00 ± 0	100,00 ± 0	95,00 ± 3,54	100,00 ± 0	100,00 ± 0
	C3	98,33 ± 1,18	98,33 ± 1,18	98,33 ± 1,18	98,33 ± 1,18	100,00 ± 0
	C4	100,00 ± 0	98,33 ± 1,18	100,00 ± 0	100,00 ± 0	98,33 ± 1,18
	C5	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0	100,00 ± 0	96,67 ± 2,36

CN: controle negativo; C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L.

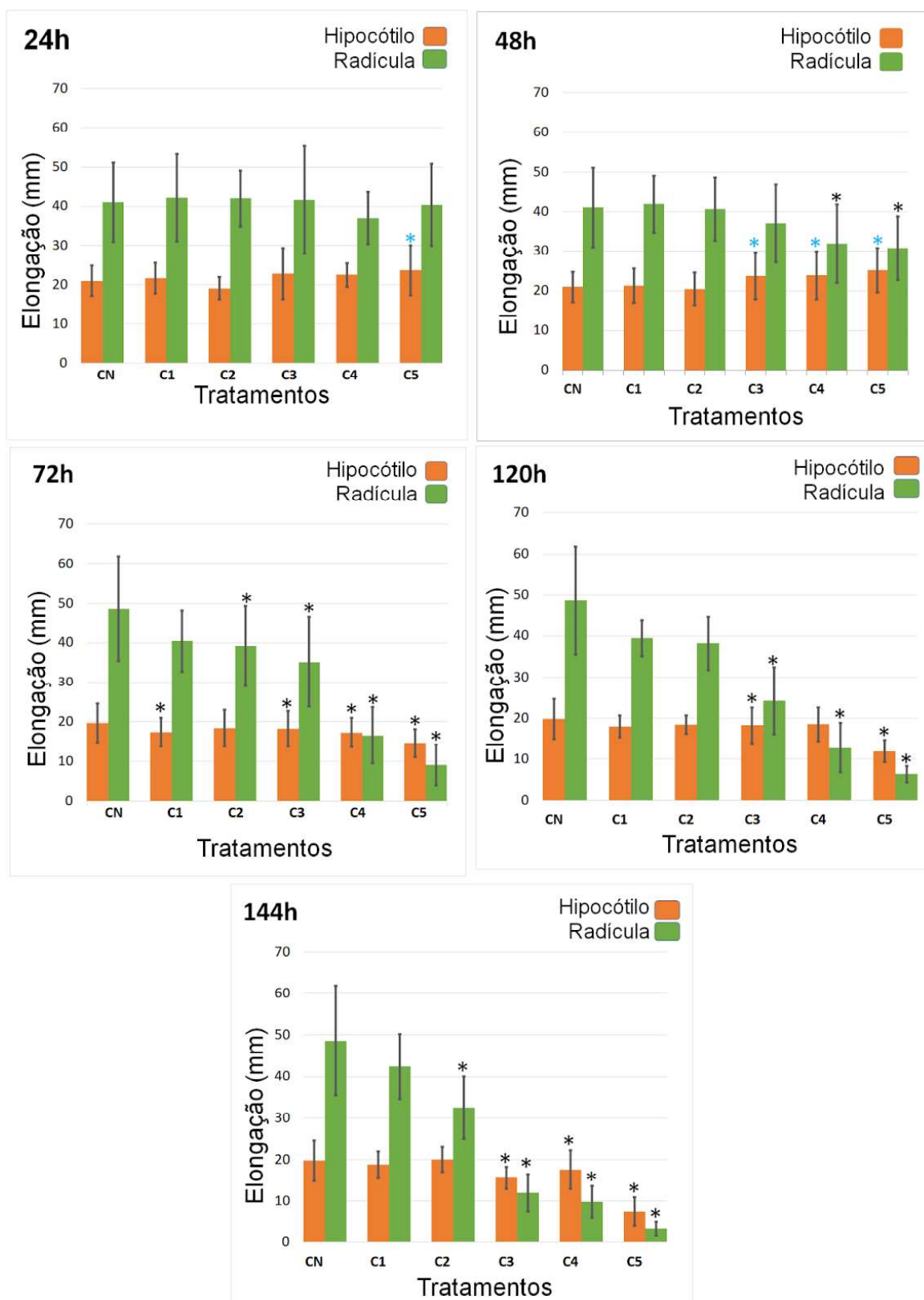


Figura 2. Comprimento da radícula e do hipocótilo de *L. sativa* expostas a soluções aquosas do fertilizante vítreo. CN: controle negativo; C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L.* diminuição estatisticamente significativa em relação ao CN; * aumento estatisticamente significativo em relação ao CN (Kruskal Wallis: $p < 0,05$).

Em relação ao efeito sobre a elongação das radículas e dos hipocótilos, nenhum efeito tóxico foi observado para as concentrações solubilizadas no período de 24h. Contudo, após 48h de liberação, nota-se diminuição significativa no comprimento da radícula para as concentrações C4 e C5, sendo que, a partir de 72h, inicia-se uma série de inibições graduais do crescimento tanto no hipocótilo quanto da radícula, para quase todas as concentrações testadas em, pelo menos, uma das estruturas vegetais. Ainda, efeitos mais pronunciados foram observados em C3, C4 e C5 em 120h e nas concentrações C2, C3, C4 e C5 em 144h.

Também foi possível verificar que a radícula e o hipocótilo variaram quanto ao nível de sensibilidade ao fertilizante vítreo, sendo a radícula a primeira estrutura a demonstrar efeitos prejudiciais, logo no tempo de 48h, nas duas concentrações mais altas. De acordo com Chan-Keb *et al.* (2022) isso ocorre porque, embora ambas as estruturas estejam em contato direto com a solução, a radícula é responsável pela absorção, sofrendo estresse fisiológico adicional.

Quanto ao IG, o qual leva em conta a taxa de germinação combinada com o comprimento da radícula, foi possível verificar que as soluções do fertilizante testadas foram classificadas como moderadamente tóxicas ($IG > 30\%$ e $< 80\%$) em 48h (C4 e C5), 72h (C3 e C4), 120h (C3 e C4) e 144h (C2) e altamente tóxicas ($IG < 30\%$) em 72h (C5), 120h (C5) e 144h (C3, C4 e C5), conforme a figura 3. No entanto, a C1 foi considerada como não tóxica em todos os períodos testados. Dessa forma, nota-se que os efeitos fitotóxicos mais significativos acontecem nas maiores concentrações e nos maiores tempos de liberação, evidenciando a importância de estabelecer uma concentração ideal de aplicação.

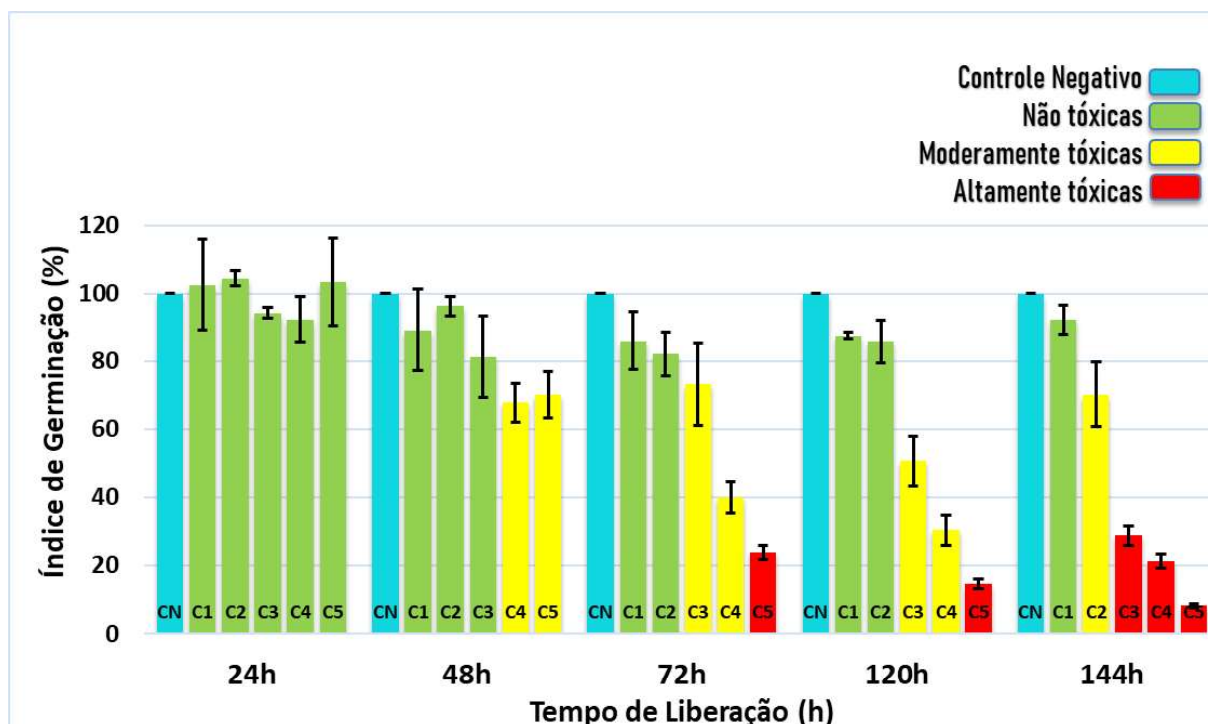


Figura 3. Comparação entre os índices de germinação obtidos no ensaio de fitotoxicidade com *L. sativa*, após exposição a diferentes soluções aquosas do fertilizante. CN: controle negativo; C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L.

Garduque *et al.* (2020) avaliaram a fitotoxicidade de um fertilizante de nova geração, um hidrogel a base de celulose contendo NPK, e observaram valores de IG de cerca de 62% para *L. sativa*, após 72h de exposição das sementes à uma solução aquosa contendo 5% do hidrogel. Resultados mais promissores foram observados no presente estudo, no qual a exposição ao fertilizante vítreo foi realizada por um período de 120h, sendo que das 25 soluções testadas, 17 apresentaram IG acima de 60%, o que, de acordo com Zucconi *et al.*, (1985) é considerado o limite mínimo para a utilização de materiais fertilizantes com segurança. Em um outro estudo sobre a fitotoxicidade de nanotubos de haloisita para síntese de fertilizantes de liberação controlada, constatou-se que, assim como o fertilizante vítreo, os nanotubos não alteraram a taxa de germinação de sementes de trigo, porém em concentrações mais elevadas (100 mg/mL) observou-se uma inibição significativa do comprimento da raiz (CHEN *et al.*, 2021). Segundo esses mesmos autores, esse efeito foi decorrente da obstrução dos poros radiculares pelo acúmulo dos nanotubos, levando à diminuição da absorção de água e nutrientes pela radícula, o que não acontece no caso do fertilizante vítreo.

O fertilizante NPK, convencionalmente utilizado na agricultura, ocasionou efeitos ainda mais pronunciados em *Vigna radiata* (feijão mungu), acarretando na diminuição da taxa de germinação e comprimento de folhas e raízes, quando aplicado em uma solução de 0,5% (RAMTEKE *et al.*, 2013).

Como o fertilizante vítreo testado no presente estudo não apresenta nenhum revestimento que possa conferir um efeito fitotóxico adicional e a liberação dos seus sais inorgânicos constituintes é lenta, esse fertilizante apresenta vantagens sobre os demais, tornando-o bastante promissor para uso agrícola e seguro ambientalmente.

Altas doses de fertilizantes podem acentuar a acidificação e salinidade do solo ao elevar o acúmulo de sais nesse meio (MIKULA *et al.*, 2020). A toxicidade aqui observada, para as maiores concentrações avaliadas, pode estar relacionada, em partes, com a diminuição do pH das amostras em associação com acúmulo de nutrientes do meio, já que as maiores concentrações apresentaram os menores valores de pH (tabela 3).

Segundo estudos realizados por Chen *et al.* (2021), com hidroponia em mudas de pêra, altas doses de P (5 mM) resultaram na diminuição da absorção de Zn, Cu, Mn e B, além de causar inibição no crescimento e desenvolvimento das mudas. O Ca também esteve entre um dos elementos de maior concentração nas soluções aquosas, contudo, Gustiar *et al.* (2020) constataram a toxicidade desse macronutriente para *L. sativa* e *Brassica juncea* apenas em concentrações superiores a 300 mg/L. No presente trabalho, a maior concentração de Ca foi observada para a C5, após 144 h de solubilização, sendo esta referente a 212 mg/L. Os resultados de fitotoxicidade encontrados também não podem ser atribuídos diretamente ao Zn, uma vez que efeitos adversos para *L. sativa* foram observados quando nanopartículas de Zn estavam presentes em concentrações próximas de 1000 mg/Kg (SONG; KIM, 2020), concentração muito superior à quantificada aqui. Assim, possivelmente, a toxicidade observada sobre o crescimento da radícula e do hipocótilo nas concentrações maiores foi relativa ao efeito aditivo desses elementos, os quais contribuíram para um aumento da salinidade do meio, acarretando em estresses iônico e osmótico (SHABALA; CUIN, 2008).

Desse modo, a administração ideal de fertilizantes consiste em adequar as doses às necessidades de cada cultivo, uma vez que tanto a deficiência quanto o excesso de nutrientes podem causar toxicidade às plantas (MIKULA *et al.*, 2020). Adicionalmente, em geral, os fertilizantes são empregados para promover o

crescimento de plantas em estágios mais avançados de desenvolvimento, quando a planta apresenta menor sensibilidade do que no início da germinação (GARDUQUE *et al.*, 2020), tolerando concentrações mais elevadas.

Vale ressaltar ainda que as soluções apresentaram concentrações de nutrientes acima do esperado para liberação em campo, por terem sido preparadas em condições otimizadas.

3.3 Teste de citogenotoxicidade com *Allium cepa*

Os resultados referentes à avaliação da citotoxicidade e genotoxicidade dos extratos aquosos do fertilizante vítreo estão apresentados na figura 4 e tabela 5, respectivamente. Em *A. cepa*, esses parâmetros são bastante sensíveis e vem sendo empregados satisfatoriamente para avaliar a segurança ambiental de fertilizantes de nova geração (CARITÁ; MAZZEO; MARIN-MORALES, 2019; MAZZEO *et al.*, 2015; PANTANO *et al.*, 2021; SOMMAGGIO *et al.*, 2018).

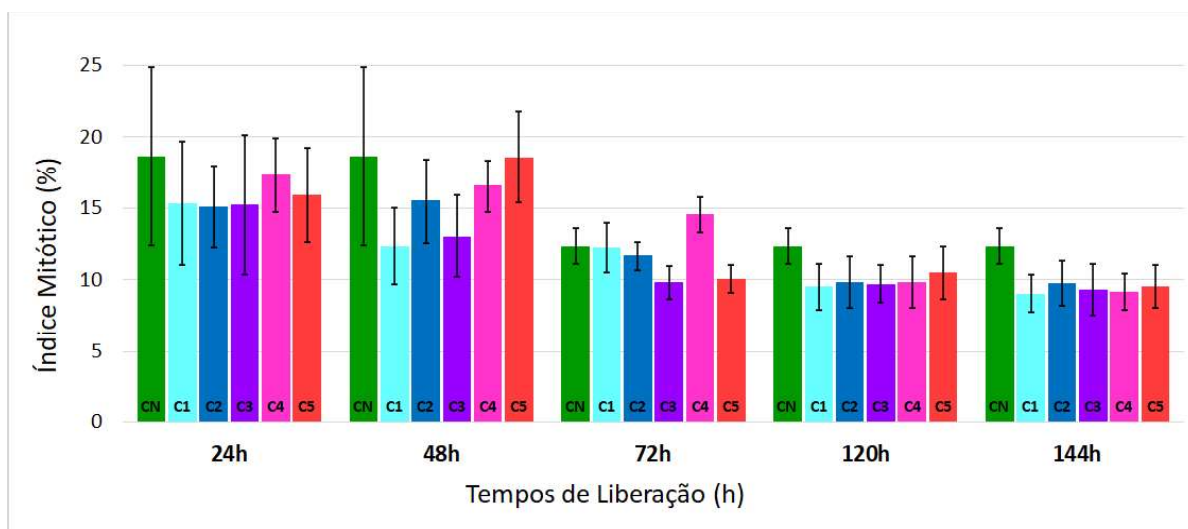


Figura 4. Comparação entre os índices mitóticos obtidos no ensaio de citotoxicidade com *A. cepa*, após exposição a diferentes soluções aquosas do fertilizante. CN: controle negativo; C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L.

Tabela 5 – Taxa de genotoxicidade (%) em *A. cepa* com amostras solubilizadas.

		24h	48h	72h	120h	144h
Genotoxicidade (%)	CN	0,46 ± 0,73	0,33 ± 0,7	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
	CP	46,46 ± 14,2*	46,46 ± 14 *	21,57 ± 4,6*	21,57 ± 4,64*	21,57 ± 4,64*
	C1	0,45 ± 0,62	0,75 ± 1,2	0 ± 0	0,15 ± 0,53	0 ± 0
	C2	0,38 ± 1,25	0,19 ± 0,4	0 ± 0	0,08 ± 0,26	0 ± 0
	C3	0,59 ± 1,10	0,80 ± 1,28	0,16 ± 0,39	1,00 ± 0,92	1,69 ± 1,1
	C4	0,33 ± 0,6	0,26 ± 0,58	0,56 ± 0,6	1,61 ± 1,32	2,47 ± 1,79
	C5	0,63 ± 0,94	0,40 ± 0,7	1,21 ± 0,9	2,00 ± 0,65	3,56 ± 1,27*

CN: controle negativo; CP: controle positivo; C1: 0,317 g/L; C2: 0,633 g/L; C3: 1,267 g/L; C4: 2,534 g/L; C5: 5,063 g/L. * estatisticamente significativo em relação ao CN (Kruskal Wallis: $p < 0,05$).

O índice mitótico (efeito citotóxico) não foi afetado de forma estatisticamente significativa por nenhuma das concentrações e em nenhum dos períodos avaliados (Figura 4), indicando que o fertilizante vítreo não causou impacto negativo na divisão celular deste organismo teste. Geralmente, o índice mitótico apresenta uma relação direta com o crescimento da raiz (DOMINGUES; DÜSMAN; VICENTINI, 2020). Contudo, no presente estudo, as maiores concentrações testadas inibiram o crescimento da radícula de *L. sativa*, o que pode sugerir uma diferença de sensibilidade entre essas duas espécies vegetais. No entanto, o índice mitótico apresenta uma relevância ecotoxicológica mais abrangente, uma vez que é um parâmetro que pode ser correlacionado com todos os organismos vivos (ADMAS; KERISEW, 2022; KASSA, 2021).

Já para o parâmetro de genotoxicidade, o fertilizante impactou apenas na maior concentração testada e no período mais prolongado de solubilização, a C5 no tempo de 144h de solubilização (Tabela 5). Dados genotóxicos também representam um importante valor ecotoxicológico, pois como o alvo de ação é o material genético, presente nas células de todos os seres vivos, os resultados podem ser correlacionados com outros organismos de níveis tróficos diferentes (LEME; MARIN-MORALES, 2009).

As alterações genotóxicas mais frequentemente observadas nessa amostra incluem, respectivamente, intérfase com micronúcleo, prófase com micronúcleo e telófase com ponte cromossômica (Figura 5). Os micronúcleos são pequenas porções de DNA, delimitados por um envoltório nuclear, porém separados espacialmente do núcleo celular em decorrência de instabilidade cromossômica e genotoxicidade (KRUPINA; GOGINASHVILI; CLEVELAND, 2021). Micronúcleos são formados por

erros no processo de divisão celular, quando cromossomos atrasados ou fragmentados não conseguem se incorporar a um dos núcleos das células filhas (KWON; LEIBOWITZ; LEE, 2020). Já as pontes cromossômicas originam-se durante a anáfase, quando os centrômeros dos cromossomos são puxados para pólos opostos da célula, no processo de divisão celular. Na ausência de rompimento das cromátides irmãs cromossômicas, a ligação entre elas permanece e, desta forma, a ponte é formada (FENECH *et al.*, 2012).

Contudo, estudos com fertilizantes convencionais apresentaram efeitos ainda mais severos. Surgun-Acar *et al.* (2019) estudaram o efeito genotóxico de fertilizantes químicos comumente utilizados na agricultura (sulfato de amônio e fosfato de diamônio) sobre raízes de *A. cepa* expostas por 48h às concentrações de 1280 e 2560 ppm. A partir dos resultados obtidos com o ensaio do cometa, os autores observaram que os fertilizantes induziram a fragmentação do DNA em níveis significativos, sendo o fosfato de diamônio comprovadamente mais genotóxico do que o sulfato de amônio nas mesmas concentrações testadas.

Já, Sukesh e Jemima (2022) analisaram a genotoxicidade causada pelo fertilizante NPK (19-19-19, Akshya) em células mononucleares do sangue periférico humano. A exposição à concentração de 7,017 mg/mL por 24h resultou em 97,5% das células com danos no DNA, principalmente de classe 2, pela avaliação com o ensaio do cometa. Além disso, os autores também observaram a presença de células polinucleadas, necrose e apoptose celular em quantidades significativas. Helen *et al.* (2020) também testaram o fertilizante NPK expondo juvenis de *Clarias gariepinus* (peixe gato) em concentrações de 2,26, 4,52 e 11,30 mg/L. A genotoxicidade observada foi significativamente maior após 7 dias para as duas concentrações mais elevadas e após 14 dias para a menor concentração, resultando em alterações nos parâmetros de estresse oxidativo nos tecidos dos peixes e formação de micronúcleos nos eritrócitos.

O fertilizante vítreo aqui estudado excede as concentrações de P (956 mg/L) e K (271 mg/L) na maior concentração e tempo de solubilização testados, em comparação com os trabalhos anteriores. Dessa forma, uma provável hipótese da causa da genotoxicidade detectada observada nessa concentração pode estar relacionada ao excesso de P, K ou a combinação de ambos.

Outra possível explicação para a genotoxicidade observada na maior concentração testada e no período mais prolongado de solubilização é a acidificação

do meio (Tabela 3), já que segundo Monarca *et al.* (2005) plantas expostas a meios com pH mais ácido apresentaram genotoxicidade mais elevada.

Dessa forma, a aplicação do fertilizante deve respeitar as necessidades nutricionais de cada cultivo agrícola, do contrário, efeitos ecotóxicos podem surgir pela inibição do crescimento das raízes, como demonstrado em *L. sativa* e efeitos genotóxicos, observados em *A. cepa*.

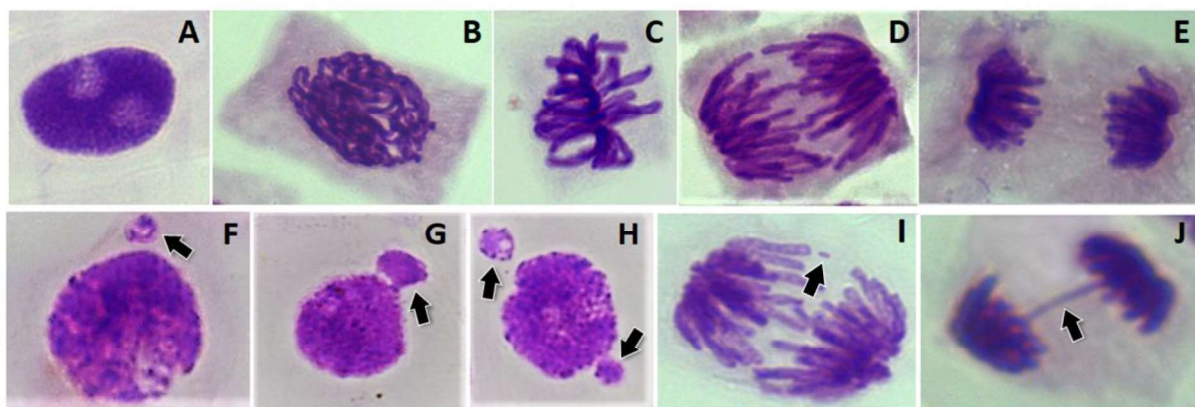


Figura 5. Fases da divisão celular normais, aberrações cromossômicas e alterações nucleares observadas nos ensaios de genotoxicidade em células meristemáticas de *A. cepa* expostas ao fertilizante vítreo. A: intérfase normal; B: prófase normal; C: metáfase normal; D: anáfase normal; E: telófase normal; F: micronúcleo em intérfase (seta); G: broto nuclear em intérfase (seta); H: micronúcleo e broto em intérfase (setas); I: quebra cromossômica em anáfase (seta); J: ponte cromossômica em telófase (seta). Aumento: 1000x.

4 Conclusão

Os extratos aquosos do fertilizante vítreo testado demonstrou eficiência em liberar os nutrientes de forma lenta e gradual. Contudo, a aplicação de elevadas concentrações do fertilizante vítreo em condições altamente otimizadas de liberação podem causar efeitos fitotóxicos não desejados ao inibir o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas, sendo indicada apenas a aplicação da concentração C1 (0,317 g/L) do fertilizante, a qual não apresentou efeito fitotóxico nas condições mencionadas. Adicionalmente, danos genotóxicos podem ser observados na concentração de 5,063 g/L do fertilizante, quando solubilizada por 144h.

Esses efeitos negativos observados podem ser resultado de duas hipóteses principais: uma alta taxa de fósforo e/ou potássio na composição do produto, capaz de inibir a absorção de outros nutrientes pela planta e uma acidificação do meio pelo acúmulo de vários nutrientes no meio, efeitos que podem estar relacionados à

fitotoxicidade e à genotoxicidade. Portanto, sugere-se a aplicação do fertilizante em concentrações baixas e adequadas a cada cultivo agrícola, para que não ocorra o surgimento de efeitos ecotóxicos não desejados.

5 Referências

ADHYA, T. K. *et al.* Microbial mobilization of soil phosphorus and sustainable P management in agricultural soils. **Current Science**. v. 108, n. 7, p. 1280 - 1287, 2015. Disponível em: <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/108/07/1280.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2023.

ADMAS, T.; KERISEW, B. Assessment of cytotoxicity and genotoxicity potential of effluents from Bahir Dar Tannery using *Allium cepa*. **Advances in Public Health**, p. 1 - 10, 2022. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/aph/2022/5519304/>. Acesso em: 28 jul 2023.

BENLAMLIH, F. Z. Evaluation of a New Generation of Coated Fertilizers to Reduce the Leaching of Mineral Nutrients and Greenhouse Gas (N₂O) Emissions. **Agronomy**. v. 11, p. 1 - 19, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/6/1129>. Acesso em: 06 jun 2023.

BLÁHA, L.; HOFMAN, J. Ecotoxicology of environmental pollutants. **Advanced Nano-Bio Technologies for Water and Soil Treatment**, p. 549 - 572, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-29840-1_27. Acesso em: 28 jul 2023.

CARITÁ, R., MAZZEO, D. E. C., MARIN-MORALES, M. A. Comparison of the toxicogenetic potential of sewage sludges from different treatment processes focusing agricultural use. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, 21475 - 21483, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-05453-y>. Acesso em: 26 jul. 2023.

CECAGNO, D. *et al.* Acidificação do solo sob fertilização nitrogenada de longo prazo em campo nativo com introdução de azevém. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. v. 18, n. 2, p. 263-267, 2019. Disponível em: <https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/10326>. Acesso em: 03 abr 2023.

CHANDINI *et al.* Chapter-5 the impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem. **Research Trends in Environmental Sciences**, v. 35, 69 - 86, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331132826_The_Impact_of_Chemical_Fertilizers_o_n_our_Environment_and_Ecosystem. Acesso em: 28 jul 2023.

CHAN-KEB, C. A. *et al.* Acute phytotoxicity of four common pharmaceuticals on the germination and growth of *Lactuca sativa* L. **Applied ecology and environmental research**, v. 20, n. 5, p. 3737-3746, 2022. Acesso em: 26 mar 2023.

CHEN G. *et al.* Physiological and Morphological Responses of Hydroponically Grown Pear Rootstock Under Phosphorus Treatment. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1 - 14, 2021. Acesso em: 09 mar 2023.

CHEN, L. *et al.* Phytotoxicity of halloysite nanotubes using wheat as a model: seed germination and growth. **Environmental Science: Nano**, v. 8, p. 1-37, 2021. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/en/d1en00507c>. Acesso em: 26 mar 2023.

DOMINGUES, G.; DÜSMAN, E.; VICENTINI, V. E. P. Cytotoxicity of Crude and Treated Liquid Effluents from Textile Industry Dyeing Using Bioindicator *Allium cepa* L. **Water Air Soil Pollut**, v. 231, p. 1 - 10, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-020-04818-1>. Acesso em: 28 jul 2023.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Ecological effects test guidelines (OPPTS 850.4200): seed germination/root elongation toxicity test public draft**. 1996.

ERSUNDU, M., Ç.; KUZU, B.; ERSUNDU, A., E. Structural properties and dissolution behavior of new generation controlled release phosphate glass fertilizers. **Journal of Non-Crystalline Solids**. v. 576, p. 1 - 15, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309321006001?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jul. 2023.

FENECH, M. *et al.* Molecular mechanisms of micronucleus, nucleoplasmic bridge and nuclear bud formation in mammalian and human cells. **Mutagenesis**, v. 26, n. 1, p. 125 - 132, 2011. Disponível em: <https://academic.oup.com/mutage/article/26/1/125/1054873?login=false>. Acesso em: 28 jul 2023.

FERREIRA, E. B.; ZANOTTO, E. D.; SCUDELLER, L. A. M. Nano vitrocerâmica de escória de aciaria. **Química Nova**. v. 25, p. 731 - 735, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/jRYxBCjrDjtnKqbqywTF5TB/?lang=pt#>. Acesso em: 06 jun 2023.

GARDUQUE, R. G. *et al.* Synthesis and characterization of sodium carboxymethyl cellulose/sodium alginate/hydroxypropyl cellulose hydrogel for agricultural water storage and controlled nutrient release. **Solid State Phenomena**. v. 304, p. 51-57, 2020. Disponível em: <https://www.scientific.net/SSP.304.51>. Acesso em: 05 jun 2023.

GOMES, C. S. Impactos da expansão do agronegócio brasileiro na conservação dos recursos naturais. **Cadernos do Leste**. v. 19, n. 19, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/caderleste/article/view/13160/10396>. Acesso em: 06 jun 2023.

GONÇALVES, M. M. C *et al.* Phytotoxicity and cytogenotoxicity of composted tannery sludge. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 27, 34495 - 34502, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09662-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-09662-8>. Acesso em: 02 jul 2021.

HAZRA, G.; DAS, T. A review on controlled release advanced glassy fertilizer. **Global Journal of Science Frontier Research: B Chemistry**, v. 14, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/8054524/A_Review_on_Controlled_Release_Advanced_Glassy_Fertilizer. Acesso em: 28 jul 2023.

HEBEBRAND, C.; LABORDE, D. High fertilizer prices contribute to rising global food security concerns. **International Food Policy Research Institute**, p. 38 - 42, 2023. Disponível em: <https://www.ifpri.org/blog/high-fertilizer-prices-contribute-rising-global-food-security-concerns>. Acesso em: 28 jul 2023.

HELEN, E. N. *et al.* Genotoxicity and oxidative stress evaluations in *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) juveniles exposed to NPK fertilizer. **Journal of Aquatic Animal Health**, v. 32, p. 149 - 156, 2020. Disponível em: <https://afspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aah.10110>. Acesso em: 31 jul 2023.

HEPLER, P. K. Calcium: a central regulator of plant growth and development. **The Plant Cell**, v. 17, n. 8, p. 2142 - 2155, 2005. Disponível em: <https://academic.oup.com/plcell/article/17/8/2142/6114599?login=false>. Acesso em: 28 jul 2023.

KASSA, B. A. Cytotoxicity and Genotoxicity evaluation of municipal wastewater discharged into the head of Blue Nile River using the *Allium cepa* test. **Scientific African**, v. 13, e00911, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227621002155>. Acesso em: 28 jul 2023.

KIRKBY, E. A.; JOHNSTON, A. E. Soil and fertilizer phosphorus in relation to crop nutrition. **The ecophysiology of plant-phosphorus interactions**, p. 177 - 223, 2008. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8435-5_9. Acesso em: 25 jul 2023.

KRUPINA, K.; GOGINASHVILI, A.; CLEVELAND, D. W. Causes and consequences of micronuclei. **Current Opinion in Cell Biology**, v. 70, p. 91 - 99, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0955067421000041>. Acesso em: 2023.

KWON, M.; LEIBOWITZ, M. L.; LEE, J. H. Small but mighty: the causes and consequences of micronucleus rupture. **Experimental & Molecular Medicine**, v. 52, p. 1777 - 1786, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s12276-020-00529-z#citeas>. Acesso em: 28 jul 2023.

LABBILTA, T. *et al.* Innovative Formulations of Phosphate Glasses as Controlled-Release Fertilizers to Improve Tomato Crop Growth, Yield and Fruit Quality. **Molecules**. v. 26, p. 1 - 21, 2021a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/13/3928>. Acesso em: 14 jun 2023.

LABBILTA, T. *et al.* Elaboration and characterization of vitreous fertilizers and study of their impact on the growth, photosynthesis, and yield of wheat (*Triticum durum* L.). **Materials**. v. 14, n.5, p. 1 - 19, 2021b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/5/1295>. Acesso em: 20 jun 2023.

LEME, D. M.; MARIN-MORALES, M. A. *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application. **Mutation Research/Reviews in Mutation Research**. Amsterdam, v. 682, n. 1, p. 71-81, jul. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/19821>. Acesso em: 22 junho 2021.

LI, P. *et al.* Nanotechnology promotes the R&D of newgeneration micronutrient foliar fertilizers. **Royal Society of Chemistry**. v. 6, p. 69465 - 69478, 2016. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra09428g/unauth>. Acesso em: 06 jun 2023.

LIMA, F. A; SILVA, E. G. A; IWATA, B. F. Agriculturas e agricultura familiar no Brasil: uma revisão de literatura. **Revista Retratos de Assentamentos**. v. 22, n. 1, 2019. DOI: <http://10.0.97.227/2527-2594/retratosdeassentamentos/2019.v22i1.332>. Disponível em: <https://retratosdeassentamentos.com/index.php/retratos/article/view/332/294>. Acesso em: 06 jun 2023.

MACHADO, R. C. *et al.* Internal standardization as a strategy to overcome non-spectral interferences in the determination of As, Cd and Pb in mineral fertilizers by synchronous vertical dual view (SVDV) ICP OES. **Analytical Methods**, v. 12, n. 2, p. 39 - 45. 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/AY/C9AY02343G>. Acesso em: 05 jun 2022.

MAHARAJAN, T. *et al.* Utilization of molecular markers for improving the phosphorus efficiency in crop plants. **Plant Breeding**, v. 137, p. 10 - 26, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pbr.12537>. Acesso em: 26 jul 2023.

MARCELINO, J. A.; SVERZUTI, A. R. O.; TRIZOLIO, B. L. G. S. Agronegócio brasileiro e o

comportamento do setor em meio às crises econômicas e os impactos sofridos pela pandemia da COVID-19. **Boletim de Conjuntura**. v. 3, n. 9, 2020. Disponível em: <https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/67/71>. Acesso em: 06 jun 2023.

MAZZEO, D. E. C. *et al.* Monitoring the natural attenuation of a sewage sludge toxicity using the *Allium cepa* test. **Ecological Indicators**, v. 56, p. 60 - 69, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X15001508?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jul. 2023.

MIKULA, K. *et al.* Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review. **Science of The Total Environment**. v. 712, p. 1 - 9, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136365>. Acesso em: 09 mar 2023.

Ministério da Agricultura e Pecuária. **Dados abertos MAPA**. 11 out. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>. Acesso em: 06 jun 2023.

MONARCA, S. *et al.* Genotoxicity of drinking water disinfectants in plant bioassays. **Environmental and Molecular Mutagenesis**, v. 46, n. 2, p. 96 - 103, 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/em.20137>. Acesso em: 29 jul 2023.

MOURA, A. C. A. **Estudos de síntese e solubilidade de vidros óxidos multicomponentes para aplicação como fertilizantes**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (graduação em química) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

MUINDI, E., M. Understanding soil phosphorus. **International Journal of Plant & Soil Science**. v. 31, n. 2, p. 1 - 18, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338173197_Understanding_Soil_Phosphorus. Acesso em: 26 jul 2023.

NICCHIO, B. *et al.* Efeito da aplicação Foliar de Si, P e K no desenvolvimento, produção e qualidade de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá (PR). v. 14, n. 2, p. 1-14, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Bruno-Nicchio/publication/350886724_Efeito_da_aplicacao_Foliar_de_Si_P_e_K_no_desenvolvimento_producao_e_qualidade_de_soqueira_de_cana-de-acucar/links/60784842881fa114b4034347/Efeito-da-aplicacao-Foliar-de-Si-P-e-K-no-desenvolvimento-producao-e-qualidade-de-soqueira-de-cana-de-acucar.pdf. Acesso em: 31 mar 2023.

NG, J. F. *et al.* Soil nutrient retention and pH buffering capacity are enhanced by calciprill and sodium silicate. **Agronomy**, v. 12, n. 1 - 24, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/1/219>. Acesso em: 26 jul 2023.

PANTANO, G. *et al.* Toxicity of the sawdust used for phosphorus recovery in a eutrophic reservoir: experiments with *Lactuca sativa* and *Allium cepa*. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 28, n. 14, p. 18276-18283, jan. 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/209863>. Acesso em: 03 jul 2021.

RAMTEKE, A. *et al.* Study of germination effect of fertilizers like urea NPK and biozyme on some vegetable plants. **Der Chemica Sinica**, v. 4, n. 3, p. 22 - 26, 2013. Disponível em: <https://www.imedpub.com/articles/study-of-germination-effect-of-fertilizers-like-urea-npk-and-biozyme-on-somevegetable-plants.pdf>. Acesso em: 21 mar 2023.

RASHIMI, I. *et al.* Organic and inorganic fertilizer contaminants in agriculture: Impact on soil and water resources. **Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management**,

p. 3 - 41, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-41552-5_1. Acesso em: 26 jul 2023.

SARDANS, J., PEÑUELAS, J. Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 1 - 31, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/419>. Acesso em: 26 jul 2023.

SARKADI, L. S. Effects of fertilizer on food supply. In Chemistry's role in food production and sustainability: past and present. **American chemical society**, v. 1314, p. 129 - 145, 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-2019-1314.ch009>. Acesso em: 28 jul 2023.

SATO, C. Y. Meio ambiente e agronegócio no Brasil. **Controle Externo: Revista do Tribunal de Contas do Estado de Goiás**, Belo Horizonte. ano 3, n. 6, p. 141 - 151, dez. 2021. Disponível em: <https://williamfreire.com.br/wp-content/uploads/2023/04/145-Texto-do-artigo-507-1-10-20230408.pdf#page=141>. Acesso em: 05 jun 2023.

SAYED, E. G.; OUIS, M. A. Improvement of pea plants growth, yield, and seed quality using glass fertilizers and biofertilizers. **Environmental Technology & Innovation**. v. 26, p. 1 - 13, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422000451>. Acesso em: 09 jun 2023.

SELEIMAN, M. F. *et al.* Nano-Fertilization as an Emerging Fertilization Technique: Why Can Modern Agriculture Benefit from Its Use? **Plants**, v. 10, p. 1 - 27, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/1/2>. Acesso em: 28 jul 2023.

SHABALA, S.; CUIN, T. A. Potassium transport and plant salt tolerance. **Physiologia plantarum**, v. 133, n. 4, p. 651 - 669, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1399-3054.2007.01008.x>. Acesso em: 27 mar 2023.

SIMPLÍCIO, N. C. S. **Ecotoxicidade de fertilizantes: uma análise comparativa entre produtos a base de nitrogênio, fósforo e potássio e seus ingredientes ativos isoladamente**. Dissertação (Mestrado em meio ambiente e desenvolvimento rural) - Universidade de Brasília, p. 66, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/19496>. Acesso em: 28 jul 2023.

SOMMAGGIO, L. R. D. *et al.* Ecotoxicological and microbiological assessment of sewage sludge associated with sugarcane bagasse. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 147, p. 550 - 557, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651317305808?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jul 2023.

SONG, U.; KIM, J. Zinc oxide nanoparticles: a potential micronutrient fertilizer for horticultural crops with little toxicity. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**. v. 61, p. 625 - 631, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13580-020-00244-8#citeas>. Acesso em: 24 mar 2023.

SURGUN-ACAR, Y. *et al.* Evaluation of Genotoxic Effects of Commonly Used Fertilizers in *Allium cepa* Root Cells by Comet Assay. **International Journal of Environmental Research and Technology**. v. 2, n. 3, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Serter-Catav/publication/359816465_Evaluation_of_Genotoxic_Effects_of_Commonly_Used_Fertilizers_in_Allium_cepa_Root_Cells_by_Comet_Assay/links/62500f4eef0134206661a0f9/Evaluation-of-Genotoxic-Effects-of-Commonly-Used-Fertilizers-in-Allium-cepa-Root-Cells-by-Comet-Assay.pdf. Acesso em: 04 jul 2023.

KAMESH, S.; JEMIMA, A. The Genotoxicity of NPK using fluorescent staining methods on Peripheral Blood Mononuclear Cells (PBMC). **Journal of Student Research**, v. 11, n. 4, p. 1 - 14, 2022. Disponível em: <https://www.jsr.org/hs/index.php/path/article/view/3460>. Acesso em: 31 jul 2023.

WEBER, J.; SILVA, T. N. da. A Produção Orgânica no Brasil sob a Ótica do Desenvolvimento Sustentável. **Desenvolvimento em Questão**. v. 19, n. 54, p. 164 - 184, 2021. DOI: 10.21527/2237-6453.2021.54.164-184.

Disponível

em:

<https://revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/11001>. Acesso em: 06 jun 2023.

YAHAYA, S. M. *et al.* Recent advances in the chemistry of nitrogen, phosphorus and potassium as fertilizers in soil: A review. **Pedosphere**, v. 33, n. 3, p. 385 - 406, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002016022000807>. Acesso em: 26 jul 2023.

5.2 Análise ecotoxicológica de fertilizantes a base de vidros óxidos multicomponentes aplicados em solo: uma alternativa sustentável para a agricultura

Thomaz William Boaventura¹, José Hermes da Silva Soares², Ana Rita de Araujo Nogueira³, Alberto Carlos de Campos Bernardi³, Danilo Manzani⁴, Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo⁵

¹ Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular, Molecular e Microbiologia, Universidade Estadual de São Paulo - Rio Claro, SP (Brasil);

² Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade de São Paulo – São Carlos, SP

³ Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP

⁴ Departamento de Química e Física Molecular, IQ, Universidade de São Paulo - São Carlos, SP

⁵ Departamento Biotecnologia e Produção Vegetal e Animal, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos - Araras, SP

Resumo

A fertilização do solo é essencial para a produtividade agrícola, mas o uso descontrolado de fertilizantes tradicionais tem gerado desequilíbrios ambientais, poluindo o ar, solo e águas. O excesso de fertilizantes pode prejudicar a absorção de outros nutrientes pelas plantas, causando deficiências e reduzindo a produtividade da lavoura. Além disso, o acúmulo de nutrientes no solo pode levar à salinização e diminuição do pH, gerando estresse hídrico e osmótico nas plantas. Em busca de alternativas sustentáveis, surgiram os fertilizantes vítreos, que liberam nutrientes gradualmente de acordo com as necessidades das plantas e não deixam resíduos no solo, evitando a necessidade de aplicação constante. Porém, ainda há poucas informações sobre a ecotoxicidade desses novos fertilizantes. Assim, o presente estudo analisou os possíveis impactos ecotoxicológicos de um fertilizante vítreo óxido multicomponente de liberação lenta por meio de testes de fitotoxicidade com *Lactuca sativa*, citogenotoxicidade com *Allium cepa* e ensaios de respirometria para avaliar a respiração do solo. A análise foi realizada pela aplicação direta do fertilizante no solo, obtendo 5 diferentes concentrações: 0,317 g/kg, 0,633 g/kg, 1,267 g/kg, 2,534 g/kg e 5,063 g/kg. Os resultados mostraram que nenhuma das concentrações testadas do fertilizante induziu fitotoxicidade para *L. sativa*, genotoxicidade para *A. cepa*, além de ter impulsionado a respiração microbiana do solo. Desse modo, concluiu-se que esse novo material é seguro e promove práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas com os

objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Palavras-chave: Fertilizante vítreo; Agricultura sustentável; Citogenotoxicidade; *Allium cepa*; *Lactuca sativa*; Respirometria.

Abstract

Soil fertilization is essential for agricultural productivity, but the uncontrolled use of traditional fertilizers has generated environmental imbalances, polluting the air, soil and water. Excess fertilizers can impair the absorption of other nutrients by plants, causing deficiencies and reducing crop productivity. In addition, the accumulation of nutrients in the soil can lead to salinization and decrease in pH, generating water and osmotic stress in plants. In search of sustainable alternatives, glass fertilizers emerged, which release nutrients gradually according to the needs of the plants and do not leave residues in the soil, avoiding the need for constant application. However, there is still little information about the ecotoxicity of these new fertilizers. Thus, the present study analyzed the possible ecotoxicological impacts of a slow release multicomponent vitreous oxide fertilizer through phytotoxicity tests with *Lactuca sativa*, cytogenotoxicity with *Allium cepa* and respirometry tests to evaluate soil respiration. The analysis was performed by direct application of fertilizer to the soil, obtaining 5 different concentrations: 0.317 g/kg, 0.633 g/kg, 1.267 g/kg, 2.534 g/kg and 5.063 g/kg. The results showed that none of the fertilizer concentrations tested induced phytotoxicity for *L. sativa*, genotoxicity for *A. cepa*, in addition to boosting soil microbial respiration. Thus, it is concluded that this new material is safe and promotes more sustainable agricultural practices, in line with the sustainable development objectives of the 2030 Agenda, proposed by the United Nations (UN).

Keywords: Glass fertilizer; Sustainable Agriculture; Cytogenotoxicity; *Allium cepa*; *Lactuca sativa*; Respirometry

1 Introdução

Devido ao crescimento populacional exponencial, há um estímulo cada vez maior para a realização de pesquisas e promoção do desenvolvimento tecnológico com o objetivo de melhorar a produtividade agrícola e, assim, garantir alimentos de qualidade para atender toda a população mundial (LI *et al.*, 2016, BHAT; JÖUDU, 2019).

Para atingir um desenvolvimento saudável, as plantas dependem de nutrientes essenciais, como o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), os quais são fundamentais para estimular seu crescimento (BAHADUR; MEENA; KUMAR, 2014). Os fertilizantes desempenham um papel crucial no setor agrícola, pois aumentam a produtividade das colheitas, evitando a necessidade de converter mais áreas naturais em campos agrícolas (REETZ, 2017; MACIEL; TUNES, 2021). No entanto, apesar de impulsionarem o desenvolvimento das plantas, os fertilizantes tradicionais fornecem nutrientes em quantidades superiores às que as plantas conseguem absorver (YE *et al.*, 2020). Por exemplo, apenas 10% do fósforo adicionado ao solo é efetivamente aproveitado pelas plantas (COSTA *et al.*, 2012; SHANWARE; KALKAR; TRIVEDI, 2014; SIMPSON *et al.*, 2011).

Além disso, o uso de fertilizantes tradicionais pode levar a diversos problemas ambientais, como o acúmulo de nutrientes no solo, especialmente N e P, resultando na acidificação e salinização do solo, bem como sua lixiviação para corpos hídricos. Isso pode causar eutrofização e afetar a biota aquática, além de agravar o aquecimento global devido à liberação de gases do efeito estufa, como dióxido de carbono, óxido nitroso e metano (WANG *et al.*, 2017, AYELE; ATLABACHEW, 2021, BENLAMLIH, 2021).

A crescente preocupação com o ambiente e a capacidade limitada do planeta de suportar as práticas agrícolas atuais têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis para o setor agrícola (WEBER; SILVA, 2020).

Como resultado desses esforços de pesquisa, surgiram os chamados “fertilizantes inteligentes”, desenvolvidos com o propósito de fornecer os nutrientes necessários às plantas, sem desperdício. Esses fertilizantes possuem a capacidade de liberar gradualmente os nutrientes contidos em suas matrizes, de acordo com a demanda da planta, o que evita danos causados pela lixiviação excessiva

(MENDONÇA *et al.*, 2006; BORSARI, 2013). A versatilidade composicional dos fertilizantes modernos permite a incorporação de diferentes nutrientes em várias concentrações, tornando a fertilização mais precisa e adequada à velocidade de absorção dos nutrientes pelas plantas, algo especialmente importante, já que diferentes culturas requerem nutrições específicas (NADEEM *et al.*, 2018; MOURA, 2019).

Dentre os fertilizantes de nova geração, os fertilizantes vítreos surgem como uma alternativa promissora em relação aos tradicionais, devido à sua principal característica: a liberação lenta dos nutrientes. A matriz vítrea é um material de fácil obtenção, baixo custo e apresenta uma composição versátil, além de proporcionar a solubilização completa dos nutrientes (MOURA, 2019).

Por esses motivos, o desenvolvimento sustentável desses fertilizantes é encorajador, pois eles promovem a sustentabilidade no setor agrícola e atendem à demanda agroecológica, uma vez que não deixam resíduos no ambiente (SAYED; OUIS, 2022). Essa abordagem favorece a preservação do meio ambiente e reforça a busca por práticas agrícolas mais conscientes e ecologicamente responsáveis.

Apesar dos fertilizantes vítreos de liberação controlada oferecerem uma solução tecnológica promissora e mais sustentável para a agricultura de precisão em comparação com os fertilizantes convencionais, especialmente em termos econômicos e ambientais, os efeitos ecotoxicológicos desses fertilizantes ainda são pouco conhecidos. A avaliação ecotoxicológica desempenha um papel fundamental na análise de novas substâncias, pois fornece informações cruciais sobre os possíveis efeitos prejudiciais aos ecossistemas (BROOKS, 2019). Ao oferecer essas informações, contribui significativamente para a proteção do meio ambiente e a prevenção da poluição ambiental.

Diante dessa lacuna de informações, o objetivo deste estudo foi conduzir uma avaliação ecotoxicológica de um fertilizante constituído por vidros óxidos multicomponentes, com o propósito de assegurar sua aplicação segura no ambiente. Para isso, foram utilizados ensaios com *Lactuca sativa* e *Allium cepa* para a avaliação fitotóxica e citogenotóxica do fertilizante aplicado ao solo, respectivamente, além de ensaios de respirometria para verificação de alterações na respiração microbiana do solo.

2 Material e métodos

2.1 Material

O fertilizante vítreo testado refere-se a um vidro óxido multicomponente obtido pelo método tradicional de fusão-resfriamento, que possui como base para sua formação, fósforo, silício e boro, além de outros sais contendo macro e micronutrientes (Tabela 1).

Tabela 1 - Reagentes e respectivas porcentagens das massas utilizados na síntese do vidro multicomponente padrão.

Reagente	Porcentagem(%)	Produtos finais
K_2CO_3 (Carbonato de Potássio)	9,02	Potássio (K)
$CaCO_3$ (Carbonato de Cálcio)	13,01	Cálcio (Ca)
$NH_4H_2PO_4$ (Di-hidrogenofosfato de Amônio)	63,80	Fósforo (P)
B_2O_3 (Óxido de Boro)	1,36	Boro (B)
SiO_2 (Dióxido de Silício)	5,87	Silício (Si)
$MgCO_3$ (Carbonato de Magnésio)	2,74	Magnésio (Mg)
MnO_2 (Dióxido de Manganês)	0,56	Manganês (Mn)
MoO_3 (Trióxido de Molibdênio)	0,46	Molibdênio (Mo)
ZnO (Óxido de Zinco)	3,18	Zinco (Zn)

FONTE: Adaptado de Moura (2019).

Essa matriz vítrea permite uma elevada versatilidade de composição, podendo variar de acordo com as necessidades de cada cultivar. Além disso, apresenta alta solubilidade em água, sendo que a dissolução de seus componentes ocorre de modo a otimizar a liberação e a absorção dos nutrientes pelas plantas, o que caracteriza este material como um fertilizante de liberação lenta (MOURA *et al.*, 2019).

Após sua síntese, o vidro foi macerado para a obtenção de uma granulometria entre 1 e 2 mm.

O solo utilizado nos experimentos foi coletado em área de pastagem, sem histórico de aplicação de agrotóxicos, localizada na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP. As características físico-químicas deste solo encontram-se na tabela 2. Percebe-se que este solo apresenta uma acidificação natural, com pH de 4,9 em água, além de uma baixa quantidade de nutrientes.

Tabela 2 - Caracterização físico-química do solo arenoso utilizado nos experimentos.

Solo	pH	pH	M.O.	P res	K res	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	S _{SO₄}
	água	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _e dm ⁻³							%		mg dm ⁻³
Arenoso	4,9	4,3	12	4	0,6	8	2	2	39	11	50	21	16	4

	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Argila	Silte
	mg dm ⁻³					g kg ⁻¹		
Arenoso	0,16	0,4	8	1,1	0,2	727	189	84

M.O: Matéria orgânica, P res: Fósforo resina, K res: Potássio resina, Ca: Cálcio, Mg: Magnésio, H + Al: Acidez potencial, CTC: Capacidade de troca de cátions, SB: soma de bases, V: saturação por bases, m: Saturação por alumínio, S_{SO₄}: Teor de ânion sulfato, B: Boro, Cu: Cobre, Fe: Ferro, Mn: Manganês, Zn: Zinco. Fonte: Autoria própria.

2.2 Preparo das amostras

Foram utilizadas cinco concentrações diferentes do fertilizante: 0,317 g/kg, 0,633 g/kg, 1,267 g/kg, 2,534 g/kg e 5,063 g/kg. As três primeiras concentrações referem-se a dosagens de campo utilizadas no cultivo de *Brachiaria* e as duas últimas, foram obtidas progressivamente, utilizando fator 2.

Após pesagem do vidro em balança analítica, o material foi incorporado diretamente no solo, seguido por homogeneização, com auxílio de uma espátula.

2.3 Determinação da capacidade de campo e teor de umidade do solo

A capacidade de campo foi estimada adicionando solo a um funil contendo

algodão em seu interior. Posteriormente, acrescentou-se água ao solo para saturá-lo até que a água passasse pela parte inferior do funil. Em seguida, vedou-se a parte superior do funil com filme plástico para evitar a evaporação da água.

Após 24 horas, cerca de 10g do solo saturado foi retirado do funil e transferido para cápsula de porcelana tarada. Em seguida, esse material foi colocado em uma estufa a 105 °C por 24 horas e, após resfriamento em um dessecador, foi pesado novamente.

Então, calculou-se a capacidade de campo subtraindo a massa inicial e final, considerando a quantidade de água originalmente presente em cada amostra (teor de umidade).

Para a determinação da quantidade de água naturalmente presente no solo (teor de umidade), cerca de 10g de solo foram adicionados em cápsula de porcelana tarada, seguido por secagem em estufa a 105 °C por 24 h, para a eliminação de toda a água presente. Posteriormente, após resfriamento em dessecador, as cápsulas foram pesadas para a obtenção da massa seca. O teor de umidade foi calculado subtraindo a massa úmida pela massa seca.

Ambos os procedimentos foram realizados em triplicata e seguiram os protocolos descritos em Franco *et al.* (2022).

2.4 Avaliação ecotoxicológica

2.4.1 Ensaio de fitotoxicidade com *Lactuca sativa*

A avaliação do potencial fitotóxico das amostras seguiu o protocolo descrito na diretriz OPPTS 850.4200 (USEPA, 1996).

Em placas de Petri individuais, contendo 50g de solo e uma das 5 concentrações do fertilizante vítreo testado, foram distribuídas, uniformemente, 20 sementes de *L. sativa* (variedade *Wanda*). O solo teve sua capacidade de campo ajustada para 70%, com adição de 9,2 mL de água por placa. O controle negativo (CN) foi realizado exclusivamente com solo a 70% da capacidade de campo. Para o controle positivo (CP) foi utilizado sulfato de zinco heptahidratado (0,05 M - $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

As placas foram incubadas a 22 ± 2 °C, na ausência de luz, por 120h (cinco dias). O experimento foi realizado em triplicata. Então, foi quantificado o número de sementes germinadas (radícula com tamanho superior à 5 mm) e mensurado o comprimento do hipocótilo e da radícula de cada semente germinada.

A partir desses dados, calculou-se Germinação Relativa (GR), Crescimento Relativo (CR) e Índice de Germinação (IG), de acordo com as equações propostas por Tiquia (2010) e descritas a seguir:

$$\text{GR (\%)} = \frac{\text{Nº de sementes germinadas amostra}}{\text{Nº de sementes germinadas controle}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{CR (\%)} = \frac{\text{Média do crescimento das raízes amostra}}{\text{Média do crescimento das raízes controle}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

$$\text{IG (\%)} = \frac{(\% \text{ de sementes germinadas}) \times (\% \text{ crescimento radicular})}{100} \quad (\text{Equação 3})$$

Adicionalmente, as diferentes concentrações foram classificadas como não tóxicas (IG > 80%); moderadamente tóxicas (IG entre 30 e 80%); e altamente tóxicas (IG < 30%), seguindo a classificação sugerida por Gonçalves *et al.* (2020).

A análise estatística dos resultados foi realizada por meio do teste Kruskal-Wallis ($p < 0,05$), utilizando o programa BioEstat 5.1.

2.4.2 Ensaio de citogenotoxicidade com *Allium cepa*

Para os ensaios com *A. cepa*, 50 sementes da variedade Híbrida Diamantina foram uniformemente dispostas em placas de Petri individuais com 50g de solo contendo o fertilizante vítreo em uma das diferentes concentrações testadas.

O controle negativo (CN) foi realizado apenas com o solo e o controle positivo com solo + metil-metano sulfonato a 10 mg/L (MMS, Sigma-Aldrich, CAS 66-27-3).

Para todas as placas, a capacidade de campo do solo foi ajustada para 70%, sendo adicionados 9,2 mL de água ultrapura para as amostras e o CN ou 9,2 mL da solução de MMS para o CP.

Na sequência, as placas foram incubadas em BOD, por 120h (cinco dias), a 22 ± 2 °C, com fotoperíodo de 12h. O experimento foi realizado em triplicata. Após esse período, as radículas foram coletadas e fixadas em Carnoy (etanol: ácido acético glacial, 3:1, v/v), por 6 horas, seguido pela troca por um novo fixador, para posterior armazenamento a ± 4 °C.

Para a confecção e análise das lâminas com células meristemáticas, seguiu-se o protocolo estabelecido por Grant (1982). Após remoção do excesso de fixador com banho em água destilada, as raízes passaram por hidrólise ácida (HCl 1 N) por 10 minutos, seguido por marcação do DNA em reativo de Schiff por 2h. Em seguida, após retirada do excesso do corante, as radículas foram dispostas em lâminas, onde o meristema foi seccionado com o auxílio de um bisturi. Então, a região meristemática foi recoberta com uma gota de carmim acético (2%) e lamínula, sendo suavemente esmagada para promover o espalhamento das células. Na sequência, as lamínulas foram retiradas em nitrogênio líquido e o material foi recoberto com resina sintética e lamínula para a confecção de lâminas permanentes.

A análise das lâminas se deu em microscópio de luz, nos aumentos de 400X a 1000X.

O índice mitótico (IM), obtido pela razão do número de células em divisão sobre o número total de células analisadas, constituiu o parâmetro de citotoxicidade das amostras. Adicionalmente, foram considerados diferentes tipos de alterações celulares, incluindo perdas, quebras, aderências e pontes cromossômicas, micronúcleos, brotos nucleares, células poliplóides, entre outros, observados durante o ciclo celular mitótico, os quais foram considerados como alterações de caráter genotóxico.

Foram contabilizadas cerca de 500 células por lâmina, para um total de 4 lâminas por placa, totalizando 12 lâminas por tratamento. Os dados foram avaliados utilizando o software BioEstat 5.1, a partir do teste estatístico de Kruskal-Wallis, a um nível de significância de 0,05.

2.4.3 Avaliação da respiração do solo e biomassa microbiana

O teste de respirometria, proposto por Bartha e Pramer (1965), foi realizado para avaliar a atividade microbiana do solo em decorrência da adição do fertilizante vítreo.

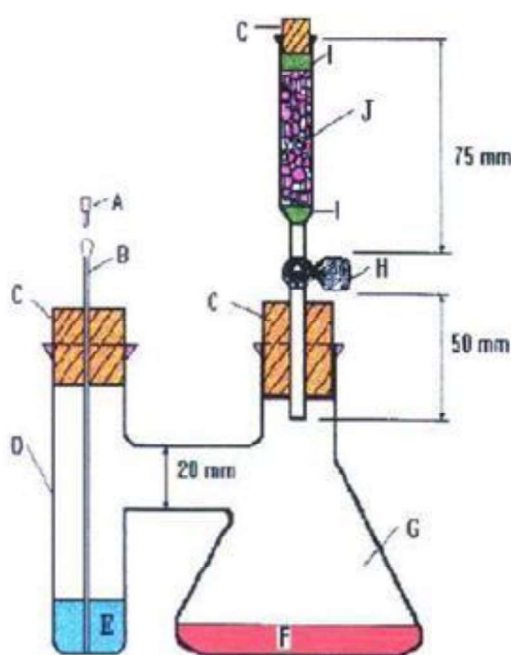
2.4.3.1 Obtenção do inóculo

Com o intuito de assegurar uma população microbiana adequada para o ensaio de respirometria, procedeu-se a preparação de um inóculo, o qual foi adicionado aos respirômetros antes do início do experimento.

Em um Erlenmeyer contendo 90 mL de caldo nutriente (extrato de levedura 2,0g/L, extrato de carne 1,0g/L, peptona 5,0g/L e cloreto de sódio 5,0g/L), foram adicionados 10g do solo controle. Em seguida, o recipiente foi colocado em uma incubadora com agitação orbital (Marconi, modelo MA 410/VF), a uma temperatura de 25 °C, com agitação por 48 horas. O inóculo foi preparado em duplicata e, posteriormente, as duas preparações foram misturadas para garantir a homogeneidade antes de serem distribuídas nos respirômetros.

2.4.3.2 Preparo, incubação e leitura dos respirômetros

As diferentes concentrações das amostras foram misturadas, individualmente com 50 g de solo e dispostas em frascos respirométricos (Figura 1) para a quantificação da produção microbiana de CO₂.



A: Cobertura da cânula; B: Cânula; C: Cortiça de borracha bem fechada; D: Braço lateral; E: Solução de KOH; F: Amostra; G: Recipiente de 350 mL; H: Válvula; I: Suporte da camada; J: Filtro de CO₂.

Figura 1: Esquema do respirômetro de Bartha. FONTE: Adaptado de Lopes; Bidoia (2009).

Foram adicionados 2 mL do inóculo a cada respirômetro (com exceção do grupo controle) e a capacidade de campo foi ajustada para 60%. Ao braço lateral dos respirômetros, foram acrescentados 10 mL da solução de KOH 0,2 N e os frascos foram incubados a 28°C na ausência de luz. Além dos frascos contendo as 5

concentrações do fertilizante vítreo, foram preparados dois grupos controles, o primeiro apenas contendo solo, sem a adição do inóculo (Solo) e o segundo, contendo o solo e a mesma quantidade de inóculo dos tratamentos (S + IN). O experimento foi realizado em triplicata.

A cada semana, a solução de KOH foi periodicamente retirada com seringa, adicionando 20 mL de água e a quantidade de gás carbônico absorvida foi medida por um método eletroquímico, a partir de leituras de condutividade (STROTMANN *et al.*, 2004). Este método baseia-se no fato de que a solução de hidróxido de potássio é convertida em uma solução de carbonato de potássio, devido à captura do dióxido de carbono. Como a condutividade de uma solução é proporcional à concentração dos eletrólitos nela presentes, é possível estimar a quantidade de dióxido de carbono produzido pela microbiota e fixado na solução de KOH, na forma do íon carbonato, pela medida da condutividade nesta solução alcalina.

Posteriormente a cada leitura, os respirômetros foram aerados durante 1 minuto através dos filtros de cal sodada para promover a circulação de oxigênio no sistema e a solução de KOH foi repostada.

As leituras de condutividade foram realizadas semanalmente, por um período total de 98 dias, após verificação do declínio e manutenção da taxa de CO₂ produzido por todos os tratamentos.

Ao final do experimento, a média da produção diária de CO₂ de cada tratamento e a média da produção acumulada de CO₂ foi calculada e comparada por meio de análise de variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 5%.

2.4.3.3 Construção da reta analítica

Para realizar a conversão dos valores de condutividade em quantidades equivalentes de μmol de CO₂ produzido em quantidade de CO₂ produzido, antes do início do experimento, foi realizada a construção de uma reta analítica (Figura 2). Foram preparadas 11 soluções distintas contendo quantidades diferentes de KOH 0,2M e K₂CO₃ 0,1M, sendo a primeira composta apenas por 10 mL de KOH, a última composta apenas por 10 mL de K₂CO₃ e as intermediárias, variando em 1 mL de cada solução (p.e., 9 mL de KOH e 1 mL de K₂CO₃). Para garantir proporções equivalentes às utilizadas nas leituras dos respirômetros, 20 mL de água livre de dióxido de carbono foram adicionados a cada uma dessas soluções.

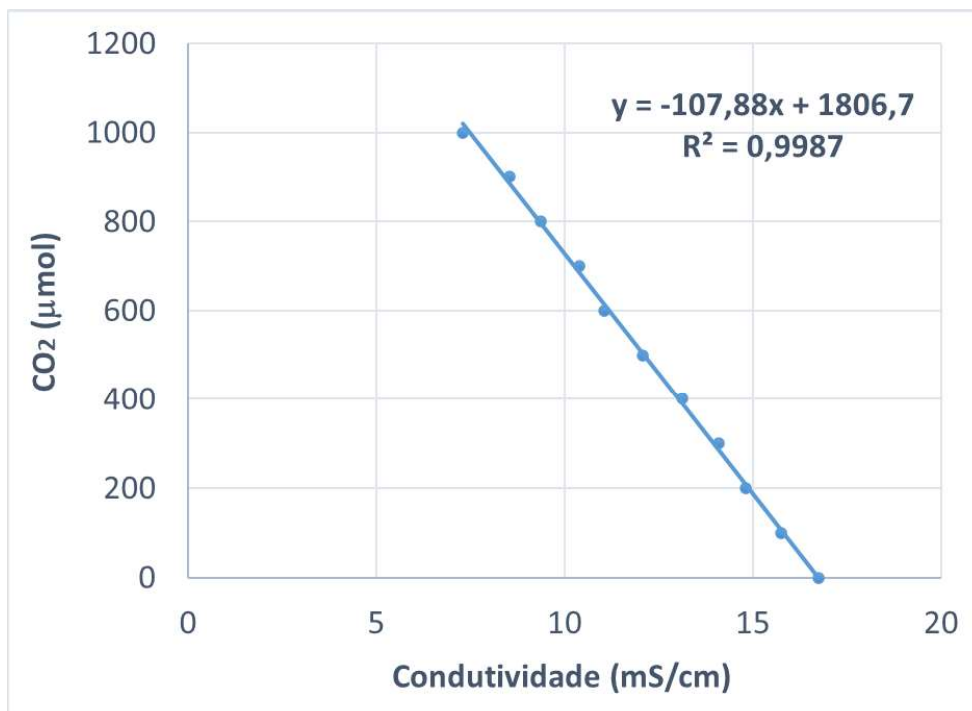


Figura 2: Reta analítica da produção de CO₂ em função da condutividade medida em solução

Posteriormente, realizou-se a medição da condutividade de todas essas soluções e os resultados obtidos foram empregados na construção de uma equação de regressão linear (Figura 2). Para realizar essa conversão, levou-se em consideração a estequiometria da reação descrita na Equação 4. Nessa reação, cada mol de CO₂ consumido gera um mol de CO₃²⁻ e esse princípio foi utilizado na análise dos resultados experimentais.



2.4.3.4 Quantificação de bactérias heterotróficas totais e fungos

Alterações na biomassa microbiana foram determinadas pelo método de contagem de placa, no início e ao final do experimento de respirometria, de acordo com o protocolo proposto por Araújo *et al.* (2003).

Para isso, 10g de solo foram diluídos em 90 mL de solução salina 0,85%, seguido por agitação constante em *shaker* por 10 minutos. Posteriormente, foram realizadas diluições sequenciais em tubos de ensaio contendo solução salina.

Para a contagem de bactérias heterotróficas totais, o plaqueamento foi feito por profundidade (*Pour Plate*), adicionando 1 mL de cada diluição em placas de Petri

estéreis, onde foram vertidos 20 mL de meio de cultura *Plate Count Agar* (PCA), com acréscimo de actidiona (5 ppm). Então, as placas foram incubadas invertidas a 35 °C por 48h até a contagem.

Para o plaqueamento de leveduras e fungos filamentosos, utilizou-se o método de espalhamento em superfície “*Spread-Plate*”, adicionando 0,1 mL das diluições em placas de Petri contendo meio de cultura *Sabouraud* Dextrose e os antibióticos cloranfenicol, estreptomicina e penicilina (200 µg/mL). As placas foram incubadas invertidas a 28 °C por 7 dias.

Os resultados das contagens foram analisados por meio do teste estatístico ANOVA 1 critério (Tukey), para avaliar a significância entre as UFC das amostras e do solo (controle), considerando o valor de $p < 0,05$.

3 Resultados e discussão

3.1 Teste de fitotoxicidade com *Lactuca sativa*

Foram avaliados os efeitos da adição do fertilizante diretamente ao solo, após 5 dias de exposição às cinco diferentes concentrações, cujos resultados estão apresentados na tabela 3 e figuras 3 e 4. Nenhuma das concentrações influenciou a taxa de germinação de *L. sativa*, apresentando valores próximos ao solo controle (Tabela 3). Além disso, também não inibiram o crescimento da radícula ou do hipocótilo (Figura 3), apresentando resultados estatisticamente similares ao controle (solo).

Tabela 3 – Germinação relativa (%) em *L. sativa* de sementes expostas ao fertilizante vítreo adicionado ao solo.

Germinação Relativa (%)	Solo	C1	C2	C3	C4	C5
	100 ± 0	106 ± 4	100 ± 0	104 ± 3	100 ± 0	100 ± 0

Solo: Solo sem adição de fertilizante; C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg.

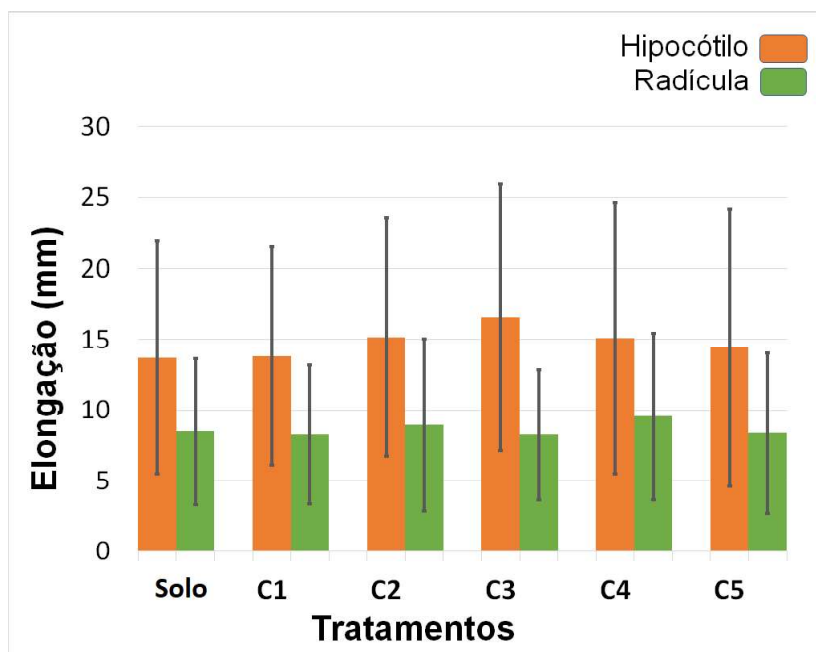


Figura 3. Comprimento da radícula e hipocótilo de *L. sativa* exposta a diferentes concentrações do fertilizante vítreo em solo. Solo: solo sem adição do fertilizante, C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg.

Em relação ao IG, foi possível verificar que o fertilizante foi classificado como não tóxico ($IG > 80\%$) em todas as concentrações testadas, mesmo para C4 e C5, que excedem a concentração de aplicação em campo em duas e quatro vezes, respectivamente (Figura 4). Desse modo, os testes de fitotoxicidade com o fertilizante vítreo em solo ressaltam o seu elevado potencial de uso agrícola, uma vez que, segundo Montesano *et al.* (2015), a ausência de fitotoxicidade representa a primeira premissa para a aprovação de novos produtos com essa finalidade.

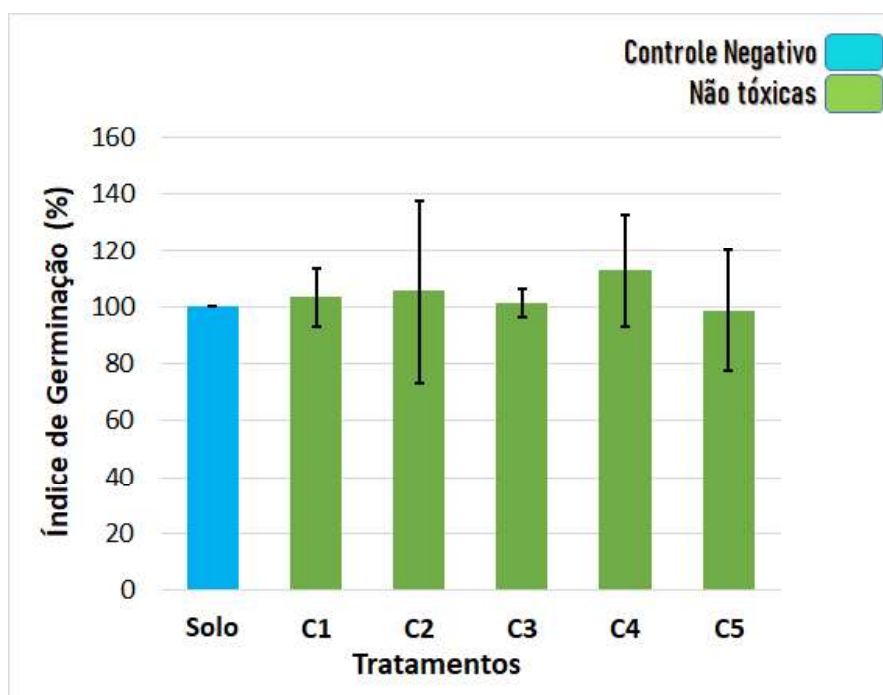


Figura 4: Comparação entre os índices de germinação do ensaio de fitotoxicidade com *L. sativa* após exposição ao solo contendo diferentes concentrações do fertilizante vítreo. Solo: solo sem adição do fertilizante; C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg.

Com base nos resultados obtidos neste estudo e nas informações encontradas na literatura científica, parece que os fertilizantes de nova geração apresentam, além das inúmeras vantagens previamente mencionadas, uma notável ausência de fitotoxicidade. Um estudo conduzido por Wyciszkievicz *et al.* (2015) confirmou a ausência de efeito fitotóxico em testes de germinação com *Lepidium sativum* (agrião) e no cultivo hidropônico de trigo utilizando um biofertilizante à base de fosfato obtido por meio da solubilização de ossos pela bactéria *Bacillus megaterium*. Pantano *et al.* (2021) também constataram que o uso de fertilizantes a base de serragem com fósforo adsorvido é ambientalmente seguro, uma vez que não interferiu na taxa de germinação e no desenvolvimento do hipocótilo e da radícula de *L. sativa*. Adicionalmente, nenhum efeito negativo foi observado no desenvolvimento de mudas de alho, feijão e quiabo expostas a fertilizantes de liberação lenta à base de hidrogeis contendo ureia, atestando a ausência de ação fitotóxica desses fertilizantes (DAS; DALEI, 2023). Em um outro estudo, fertilizantes contendo NPK encapsulados com polímeros sintetizados a partir de álcool polivinílico (PVA) e ácido polilático (PLA) não

ocasionaram efeito tóxico em variedades de alface cultivadas em solo (NOOEAD et al., 2021).

Esses estudos reforçam a confiabilidade e a segurança desses fertilizantes para o meio ambiente e para as plantas cultivadas. Contudo, vale ressaltar que a dose do fertilizante deve se adequar às necessidades do cultivo, porque um excesso de nutrientes também pode induzir toxicidade às plantas (MIKULA et al., 2020).

3.2 Teste de citogenotoxicidade com *Allium cepa*

Os resultados obtidos com o bioensaio de *A. cepa* mostram que a utilização do fertilizante não causou danos na divisão celular deste organismo teste (Figura 5) e nem genotoxicidade (Tabela 4), em nenhuma das concentrações testadas.

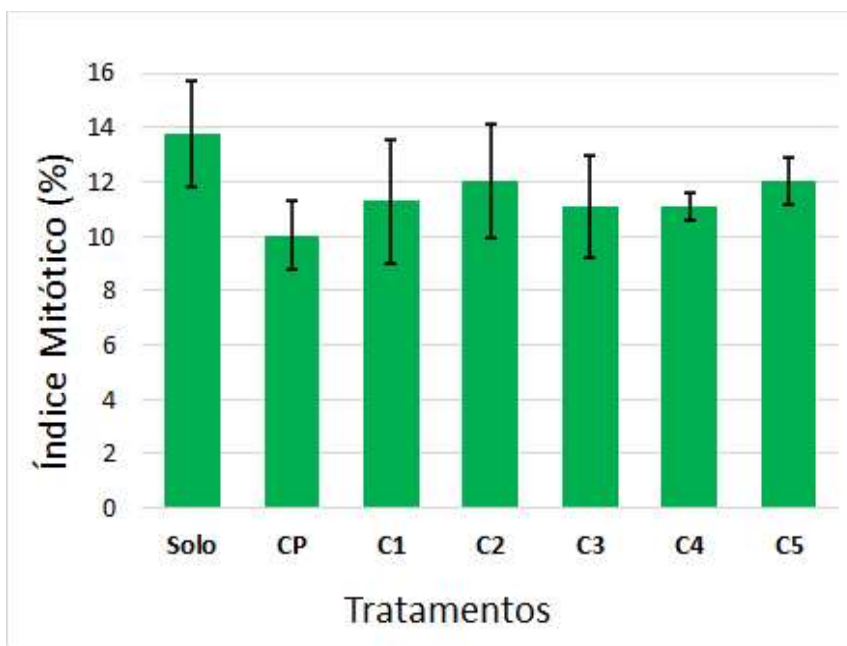


Figura 5. Comparação entre os índices mitóticos obtidos no ensaio de citotoxicidade com *A. cepa*, após exposição a diferentes concentrações do fertilizante vítreo. Solo: solo sem adição de fertilizante; CP: controle positivo; C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg.

Tabela 4 – Taxa de genotoxicidade (%) em *A. cepa* com diferentes concentrações de teste.

Genotoxicidade (%)	Solo	CP	C1	C2	C3	C4	C5
	0 ± 0	18,33 ± 5,27	0,08 ± 0,27	0 ± 0	0,24 ± 0,44	0,24 ± 0,44	0,08 ± 0,27

Solo: solo sem adição do fertilizante; CP: controle positivo; C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg.

Outros estudos avaliaram a citotoxicidade e genotoxicidade causada por fertilizantes modernos. Pantano *et al.*, (2021) observaram uma ausência de efeitos citotóxicos e genotóxicos em células meristemáticas de *A. cepa* expostas à serragem com adsorção de fósforo, atribuindo a este material um alto potencial de utilização como fertilizante agrícola. No entanto, a serragem continha apenas um tipo de nutriente (fósforo) e em baixas concentrações (41 µg/g). Em um outro estudo, ao expor a leguminosa *Vicia faba* à um fertilizante à base de polímeros nanoestruturados por irradiação gama, observou-se também ausência de efeitos negativos na divisão celular e presença de genotoxicidade apenas nas concentrações mais elevadas (SALAH; YEHA; ALI, 2022). Contudo, Abdelsalam *et al.* (2019), ao realizarem a aplicação foliar de adubação nanoparticulada de NPK no cultivo de trigo, observaram a indução de diversas aberrações cromossômicas nas células meristemáticas radiculares do grão germinado. Os autores concluíram que o nanofertilizante testado acarreta em interferências nas funções celulares, levando a danos genotóxicos severos.

Desse modo, pelos resultados constatados no presente estudo, é possível afirmar que, quando aplicado diretamente no solo, o fertilizante vítreo não induz efeitos fitotóxicos, citotóxicos e genotóxicos significativos, o que indica que possui uma elevada segurança ambiental.

3.3 Influência do fertilizante vítreo sobre a respiração microbiana do solo

Os microrganismos estão diretamente relacionados com a fertilidade do solo, pois são os principais responsáveis pela ciclagem de nutrientes, por meio dos ciclos biogeoquímicos, disponibilizando-os para as plantas (DINCĂ *et al.*, 2022; ZHU *et al.*, 2020). Desse modo, a compreensão sobre a microbiota do solo é de primordial importância para a agricultura.

O solo empregado nos ensaios apresentou um baixo número de microrganismos (Tabela 5), possivelmente por se tratar de um solo arenoso, com baixas concentrações de minerais e matéria orgânica (Tabela 2), já que a ausência de nutrientes em quantidades ótimas prejudica o crescimento microbiano (CAMENZIND *et al.*, 2017). Assim, houve a necessidade do preparo de um inóculo, visando enriquecer a microbiota deste solo utilizado. Contudo, a adição desse inóculo acarretou na diminuição do número de bactérias no período inicial dos experimentos (Tabela 5) e um leve aumento de fungos. Possivelmente, isso ocorreu porque os fungos se adaptam melhor a pH mais ácidos (YUWA-AMORNPITAK; CHOOKIETWATANA, 2018) como deste solo (pH < 5,0) (Tabela 2).

Tabela 5 – Quantificação de bactérias heterotróficas e fungos presentes nas amostras.

Período	Bactérias		Fungos	
	Amostra	Quantificação	Amostra	Quantificação
Inicial	Solo	$6,4 \times 10^4 \pm 2,83$	Solo	$1,7 \times 10^3 \pm 0,5$
	Solo + Inóculo	$1,6 \times 10^3 \pm 0,40^*$	Solo + Inóculo	$2,2 \times 10^3 \pm 0,32$
Final	Solo	$9,9 \times 10^5 \pm 1,24$	Solo	$2,1 \times 10^4 \pm 1,34$
	Solo + Inóculo	$1,68 \times 10^5 \pm 3,74$	Solo + Inóculo	$3,4 \times 10^4 \pm 0,55$
	C1	$1,37 \times 10^5 \pm 1,16$	C1	$3,9 \times 10^4 \pm 0,18$
	C2	$3,13 \times 10^5 \pm 9,50^*$	C2	$6,4 \times 10^4 \pm 0,98$
	C3	$1,85 \times 10^5 \pm 5,34$	C3	$6,1 \times 10^4 \pm 1,42$
	C4	$1,28 \times 10^5 \pm 7,51$	C4	$7,8 \times 10^4 \pm 2,50$
	C5	$7 \times 10^5 \pm 3,95$	C5	$8,6 \times 10^4 \pm 1,11$

Solo: solo sem adição do fertilizante; Solo + Inóculo: Solo sem fertilizante com adição de inóculo; C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg.

*estatisticamente significativo em relação ao solo (p < 0,05).

A aplicação de fertilizantes em solos influencia não apenas o crescimento de plantas, mas também a dinâmica das comunidades de microrganismos presentes nesse meio (GEISSELER; SCOW, 2014; WANG; CHAPMAN; YAO, 2016). Assim, avaliou-se a influência do uso do fertilizante vítreo no solo, mensurando a taxa de respiração microbiana, que é um parâmetro bastante sensível para avaliar o comprometimento do metabolismo microbiano frente à presença de compostos tóxicos ou condições limitantes do meio (PITOMBO *et al.*, 2018)

A figura 6 traz a produção semanal de CO₂ quantificada ao longo das 14 semanas. Observou-se um comportamento semelhante para as cinco concentrações testadas com o solo, tanto na presença como na ausência do inóculo, no qual as maiores taxas de liberação de CO₂ quantificadas ocorreram nas quatro primeiras semanas de análise, especialmente, na segunda semana do experimento. Também foi possível notar que a maior concentração (C5) elevou, significativamente, a taxa de produção de CO₂ em relação ao montante produzido pelo solo com adição de inóculo, chegando a quase 4X mais na décima terceira semana. A partir da 8ª semana, foi possível observar uma estabilização da produção de CO₂, o que levou à finalização do experimento na 14ª semana.

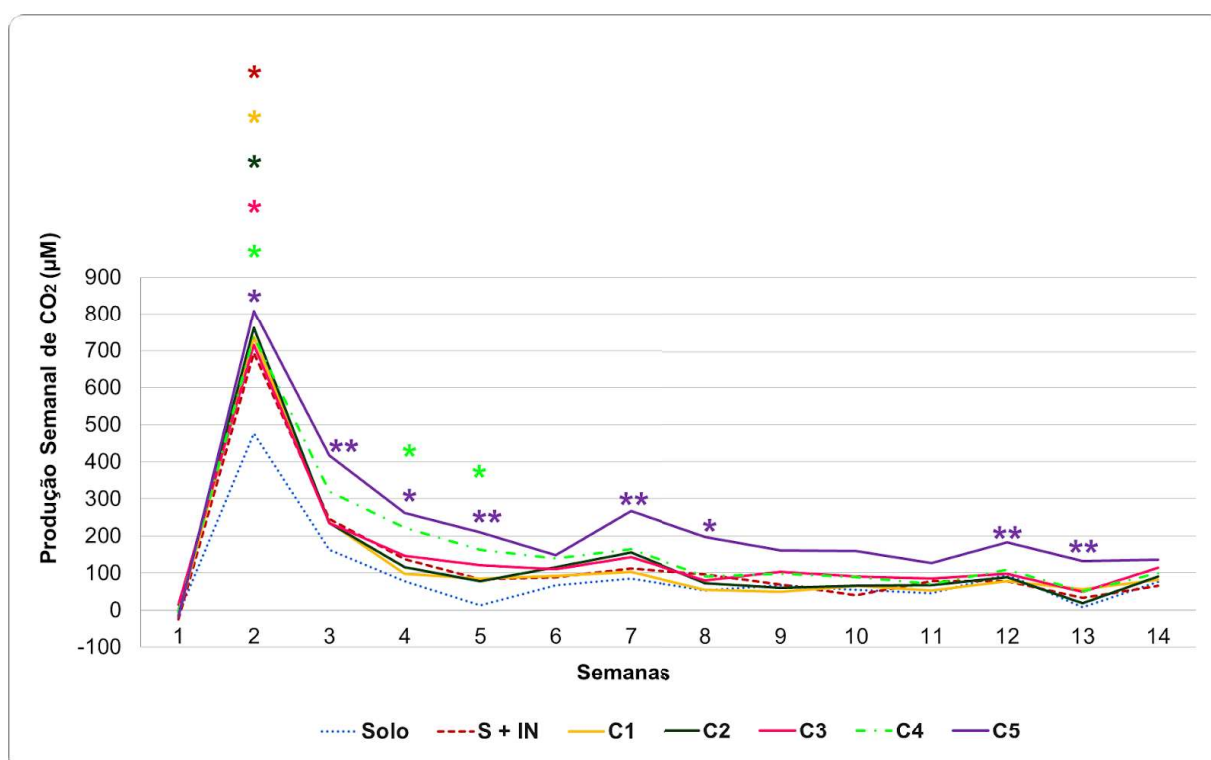


Figura 6: Produção microbiana semanal de CO₂ em solos contendo o fertilizante vítreo. Solo: solo sem adição do fertilizante; S + IN: solo sem adição de fertilizante e com adição de inóculo; C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg. * aumento estatisticamente significativo em relação ao Solo, ** aumento estatisticamente significativo em relação ao Solo e ao S + IN.

Ao analisar os resultados da respiração microbiana obtidos a partir da produção acumulada de CO₂ (Figura 7), foi possível verificar que, como esperado, o solo sem adição do fertilizante e sem inóculo (Solo) produziu a menor quantidade de CO₂ ao

longo das 14 semanas. Além disso, também notou-se uma relação direta entre a produção de CO₂ e a concentração do fertilizante vítreo, de modo que quanto maior a concentração, maior a respiração microbiana observada. Quando os valores acumulados de CO₂ foram comparados aos do solo, todas as concentrações apresentaram aumento estatisticamente significativo. Porém, esse incremento parece estar relacionado à adição do inóculo, que favoreceu um aumento na produção acumulada final de CO₂ de 1,3 X em relação ao solo. No entanto, observa-se uma produção acumulada significativamente maior para C5 em relação ao solo contendo o inóculo, efeito este que pode ser atribuído exclusivamente ao fertilizante. Desse modo, esses dados indicam que o fertilizante vítreo aqui estudado é capaz de estimular a atividade microbiana em solo, o que pode beneficiar a produtividade agrícola.

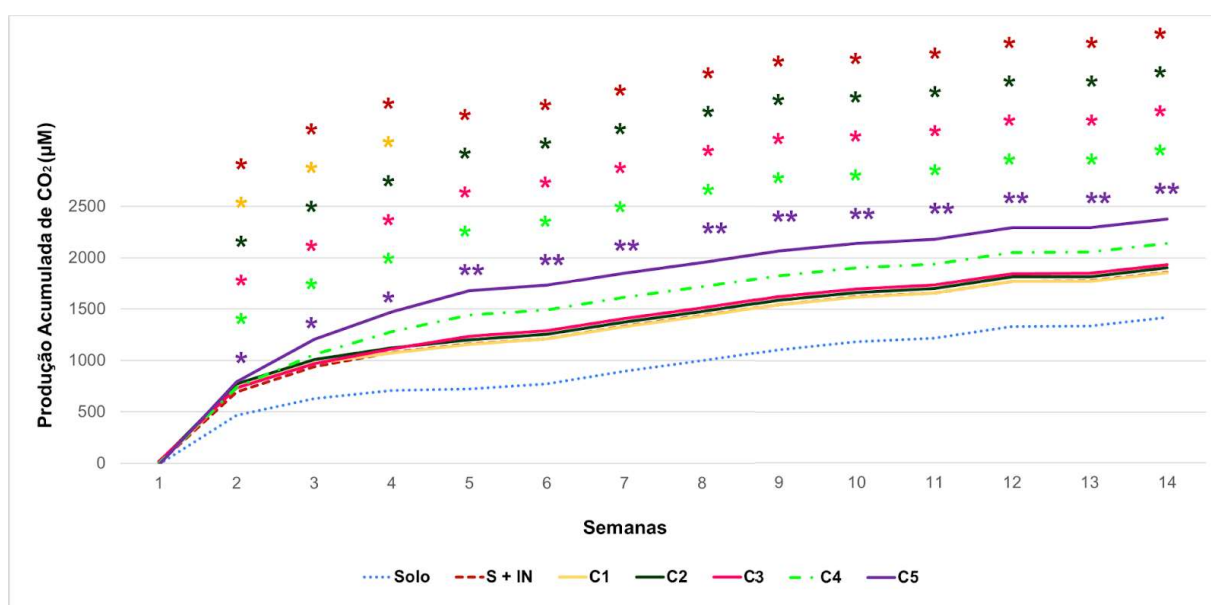


Figura 7. Produção Acumulada de CO₂. Solo: solo sem adição do fertilizante; S+IN: solo com adição de inóculo; C1: 0,317 g/kg, C2: 0,633 g/kg, C3: 1,267 g/kg, C4: 2,534 g/kg e C5: 5,063 g/kg. *aumento estatisticamente significativo em relação ao Solo, **aumento estatisticamente significativo em relação ao Solo e ao S + IN.

A quantificação de bactérias heterotróficas e fungos ao final das 14 semanas indicou que a incorporação do fertilizante vítreo estudado não alterou a quantidade de microrganismos no solo, já que nenhuma concentração alterou significativamente esse parâmetro quando comparada ao solo (Tabela 5). A única exceção foi a

concentração C2, que apesar de diferir estatisticamente do solo, não diferiu das demais concentrações.

Embora as características do solo influenciem diretamente a microbiota, outros trabalhos também apontam que a adição de fertilizantes em solo, com diferentes propriedades físico-químicas, pode favorecer a comunidade microbiana. Zhang *et al.* (2013) relataram um incremento no número de bactérias, fungos, actinomicetos e azotobactérias na rizosfera, após o emprego de fertilizante nitrogenado, o que contribuiu para um melhor rendimento no cultivo de milho. Wang *et al.* (2021) também observaram que a utilização prolongada (40 anos) de diferentes tipos de fertilizantes químicos, desde que realizada de modo balanceado, contribui para o crescimento de bactérias e arqueas em solos de cultivo de arroz. Ainda, Wang *et al.* (2017) sugerem que o aumento da biomassa microbiana ocorre porque o fertilizante estimula o crescimento das plantas e estas, por sua vez, produzem mais exsudatos que favorecem o aumento dos microrganismos. Como no presente estudo, o fertilizante vítreo foi aplicado ao solo na ausência de planta, o crescimento microbiano, possivelmente, será ainda maior quando houver interações microrganismos-plantas.

Segundo o artigo de revisão de Camenzind *et al.* (2017), analisando 42 estudos sobre o impacto da adição de N e P em solos de florestas tropicais, as adições de potássio promovem o crescimento e atividade microbiana, assim como a aplicação conjunta de P e N. Os dados analisados apoiam o pressuposto de que o P é o principal elemento limitante nas florestas tropicais e indicam a disponibilidade deste como um fator chave no conhecimento dos processos microbianos.

Em seu artigo de revisão, Dincă *et al.* (2022), concluíram que, de modo geral, a utilização de fertilizantes químicos proporciona um aumento na abundância dos microrganismos, porém quando aplicados de modo excessivo, acarretam em efeitos negativos, principalmente relacionados à diminuição da atividade enzimática dos solos. Assim, a substituição desses fertilizantes tradicionais por fertilizantes de nova geração podem contribuir para minimizar esses efeitos.

Cota-Ruiz *et al.* (2020) aplicaram nanofios de cobre como nanofertilizantes em alfafa, obtendo como um dos resultados, o aumento de microrganismos e uma maior diversidade de Proteobactérias. Ciurli *et al.* (2022) realizaram a adição de um novo nanofertilizante à base de fósforo no solo e concluíram que não houve alteração significativa em relação aos controles, indicando ausência de efeitos inibitórios na

atividade bioquímica do solo e qualquer efeito ecotoxicológico para a comunidade microbiana.

A aplicação de diferentes nanofertilizantes (P, K e Zn) no solo por método de pulverização para rendimento de trigo também revelou um aumento significativo na população de microrganismos no solo, tanto para bactérias quanto fungos (MEENA; JAT; JAIN, 2020).

Kalwani *et al.* (2022) revisaram inúmeros artigos sobre nanofertilizantes e concluíram que esse tipo de fertilizante, além de não exercer toxicidade sobre a microbiota, ainda atua induzindo seu crescimento. O mesmo foi observado aqui para o fertilizante vítreo, o qual não ocasionou nenhum efeito tóxico sobre a respiração microbiana do solo e também não limitou seu crescimento em nenhuma das concentrações testadas.

4 Conclusão

Em circunstâncias de aplicação mais fiéis à realidade agrícola, relativa à incorporação do fertilizante diretamente em solo, todas as concentrações (0,317 g/kg, 0,633 g/kg, 1,267 g/kg, 2,534 g/kg e 5,063 g/kg) mostraram-se seguras para uso, por não apresentar efeito inibidor no desenvolvimento da alface. Adicionalmente, o fertilizante não apresentou efeito genotóxico para as células e nem impactou significativamente a divisão celular de *A. cepa*. Ainda, o fertilizante não apresentou efeito tóxico para a microbiota, pelo contrário, estimulou o crescimento da atividade microbiana, aumentando o número de bactérias e fungos no solo, fator que favorece seu objetivo principal de ampliar a produtividade agrícola. Portanto, por meio dos resultados obtidos pode-se concluir que o fertilizante vítreo testado cumpre seu objetivo de fornecer nutrientes de forma gradual para as plantas, promovendo a atividade agrícola sem causar danos ao ambiente, desde que seja aplicado nas concentrações recomendadas. Esses resultados destacam o potencial do fertilizante vítreo como uma alternativa sustentável e eficiente para aprimorar a produtividade agrícola.

5 Referências

- ABDELSALAM, N. R. *et al.* Effect of foliar application of NPK nanoparticle fertilization on yield and genotoxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Elsevier**. v. 653, p. 1128 - 1139, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718343705>. Acesso em: 29 jun 2023.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R.; ABARKELI, R. B. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. **Chemosphere**. v. 52, p. 799 - 804, 2003. DOI: doi:10.1016/S0045-6535(03)00266-2. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/163844/1/Araujo-Effect-6438.pdf>. Acesso em: 20 jul 2021.
- AYELE, H. S.; ATLABACHEW, M. Review of characterization, factors, impacts, and solutions of Lake eutrophication: lesson for lake Tana, Ethiopia. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 28, p. 1 - 20. jan. 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-12081-4. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348914691_Review_of_characterization_factors_impacts_and_solutions_of_Lake_eutrophication_lesson_for_lake_Tana_Ethiopia. Acesso em: 15 jul 2021.
- BENLAMLIH, F. Z. Evaluation of a New Generation of Coated Fertilizers to Reduce the Leaching of Mineral Nutrients and Greenhouse Gas (N₂O) Emissions. **Agronomy**. v. 11, p. 1 - 19, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/6/1129>. Acesso em: 06 jun 2023.
- BAHADUR, I.; MEENA, V. S.; KUMAR, S. *Importance and application of potassic biofertilizer in Indian agriculture*. **Research Journal of Chemical Sciences**. v. 3, p. 80 - 85, dez. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Vijay-Meena-2/publication/274081635_Importance_and_Application_of_Potassic_Biofertilizer_in_Indian_Agriculture/links/55f3844108ae63926cf2504a/Importance-and-Application-of-Potassic-Biofertilizer-in-Indian-Agriculture.pdf. Acesso em: 18 jul 2021.
- BARTHA, R.; PRAMER, D. *Features of a flask and method for measuring the persistence and biological effects of pesticides in soil*. **Soil Science**, v. 100, p. 68- 70, jul. 1965.
- BHAT, R.; JÖUDU, I. Emerging issues and challenges in agri-food supply chain. **Sustainable food supply chains**. p. 23 - 37, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128134115000028>. Acesso em: 20 jul 2021.
- BORSARI, F. Fertilizantes inteligentes. **Agro DBO**, p.54 - 57, jun. 2013. Disponível em: http://www.bbagro.com.br/artigos/Tecnologia%20Edi_o%20jun13.pdf. Acesso em: 05 jul 2021.
- BROOKS, B. Greening Chemistry and Ecotoxicology Towards Sustainable Environmental Quality. **Green Chemistry**, v. 21, p. 2575 - 2582, 2019. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/GC/C8GC03893G>. Acesso em: 28 jul 2023.
- CAMENZIND, T. *et al.* Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests. **Ecological Monographs**, v. 88, n. 1, p. 4 - 21, 2017. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecm.1279>. Acesso em: 10 abr 2023.

CHEN, L. *et al.* Phytotoxicity of halloysite nanotubes using wheat as a model: seed germination and growth. **Environmental Science: Nano**, v. 8, p. 1 - 37, 2021. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/en/d1en00507c>. Acesso em: 26 mar 2023.

CIURLI, A. *et al.* A novel P nanofertilizer has no impacts on soil microbial communities and soil microbial activity. **Applied Soil Ecology**, v. 178, p. 1 - 6, 2022. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S092913932200186X?token=E8C4A6D15A9676163E14212634CEF5EC182FA80CCCE0D3D8DF5414346682D6750EA70436858D259CABD0A3FDD9651F24&originRegion=us-east-1&originCreation=20230410183329>. Acesso em: 10 abr 2023.

COSTA, P. B. *et al.* The effects of different fertilization conditions on bacterial plant growth promoting traits: guidelines for directed bacterial prospection and testing. **Plant and Soil**, v. 368, p. 267–280, nov. 2012. DOI: 10.1007/s11104-012-1513-z. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257638980_The_effects_of_different_fertilization_conditions_on_bacterial_plant_growth_promoting_traits_Guidelines_for_directed_bacterial_prospection_and_testing. Acesso em: 16 jul 2021.

COTA-RUIZ, K. *et al.* Copper nanowires as nanofertilizers for alfalfa plants: Understanding nano-bio systems interactions from microbial genomics, plant molecular responses and spectroscopic studies. **Science of the total environment**, v. 742, p. 1-9, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720340948>. Acesso em: 10 abr 2023.

DAS, S., DALEI, G. In situ forming dialdehyde xanthan gum-gelatin Schiff-base hydrogels as potent controlled release fertilizers. **Science of the Total Environment**, v. 875, p. 1 - 13, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723012767?via%3Dihub>. Acesso em: 02 ago 2023.

DINCĂ, L. C. *et al.* Fertilization and soil microbial community: a review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1 - 20, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1198>. Acesso em: 10 abr 2023.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Ecological effects test guidelines (OPPTS 850.4200)**: seed germination/root elongation toxicity test public draft. 1996.

FRANCO, N. M. *et al.* Biodegradability of water treatment sludge influenced by sewage sludge, focusing its use in agriculture as soil conditioner. *Int. J. Environmental Science & Technology*, v. 19, p. 9623 – 9638, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/222942>. Acesso em: 15 ago 2023.

GEISSELER, D.; SCOW, K. M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms—A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 75, p. 54 - 63, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071714001187>. Acesso em: 10 abr 2023.

GONÇALVES, M. M. C *et al.* Phytotoxicity and cytogenotoxicity of composted tannery sludge. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 27, 34495-34502, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09662-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-09662-8>. Acesso em: 02 jul 2021.

GRANT, W. F. 1982. Chromosome aberration assays in *Allium*: A report of the U.S. environmental protection agency gene-tox program. **Mutation Research**, v. 99, n. 3, p. 273 - 291, 1982.

KALWANI, M. *et al.* Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives. **Chemosphere**, v. 287, p. 1 - 13, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521025790>. Acesso em: 10 abr 2023.

LI, P. *et al.* Nanotechnology promotes the R&D of newgeneration micronutrient foliar fertilizers. **Royal Society of Chemistry**. v. 6, p. 69465 - 69478, 2016. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra09428g/unauth>. Acesso em: 06 jun 2023.

LOPES, R. M. T.; BIDOIA, E. D. Evaluation of the biodegradation of different types of lubricant oils in liquid medium. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. v. 52, p. 1285-1290, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000500028>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/CDYgNwHsHP5rH8rD8VYVwFR/?lang=en#>. Acesso em: 03 ago 2021.

MACIEL, L. M.; TUNES, L. V. M. A importância dos fertilizantes para a agricultura. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 7, n. 6, p. 58647 - 58658, jun. 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/31331/pdf>. Acesso em: 24 jun 2021.

MARCELINO, J. A.; SVERZUTI, A. R. O.; TRIZOLIO, B. L. G. S. Agronegócio brasileiro e o comportamento do setor em meio às crises econômicas e os impactos sofridos pela pandemia da COVID-19. **Boletim de Conjuntura**. v. 3, n. 9, 2020. Disponível em: <https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/67/71>. Acesso em: 06 jun 2023.

MEENA, R. H.; JAT, G.; JAIN, D. Impact of foliar application of different nano-fertilizers on soil microbial properties and yield of wheat. **Journal of Environmental Biology**, v. 42, p. 302 - 308, 2021. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/2961f4541a36e30d8b63cc222ba74b08/1?pq-origsite=gscholar&cbl=636374>. Acesso em: 10 abr 2023.

MENDONÇA, V. *et al.* Substratos e doses de fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de açaí. **Revista Ciências Agrárias**. Belém, n. 46, p. 275 - 285, dez. 2006. Disponível em: <http://btcc.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/272/170>. Acesso em: 23 jun 2021.

MIKULA, K. *et al.* Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review. **Science of The Total Environment**. v. 712, p. 1 - 9, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136365>. Acesso em: 09 mar 2023.

MONTESANO, F. F. *et al.* Biodegradable Superabsorbent Hydrogel Increases Water Retention Properties of Growing Media and Plant Growth. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 451 - 458, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210784315001151>. Acesso em: 02 ago 2023.

MOURA, A. C. A. **Estudos de síntese e solubilidade de vidros óxidos multicomponentes para aplicação como fertilizantes**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (graduação em química) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

NADEEM, F. *et al.* Role of macronutrients and micronutrients in the growth and development of plants and prevention of deleterious plant diseases – A comprehensive review. **International Journal of Chemical and Biochemical Sciences**. v. 13, p. 31 - 52, 2018.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/329044150_Role_of_Macronutrients_and_Micronutrients_in_the_Growth_and_Development_of_Plants_and_Prevention_of_Deleterious_Plant_Diseases_-_A_Comprehensive_Review. Acesso em: 04 jul 2021.

NOOEAD, P., *et al.* Eco-Friendly Polyvinyl Alcohol/Polylactic Acid Core/Shell Structured Fibers as Controlled-Release Fertilizers for Sustainable Agriculture. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 29, p. 552 - 564, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-020-01902-9#citeas>. Acesso em: 02 ago 2023.

PANTANO, G. *et al.* Toxicity of the sawdust used for phosphorus recovery in a eutrophic reservoir: experiments with *Lactuca sativa* and *Allium cepa*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 14, p. 18276-18283, jan. 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/209863>. Acesso em: 03 jul 2021.

PITOMBO, L. M. *et al.* Methodology for soil respirometric assays: Step by step and guidelines to measure fluxes of trace gases using microcosms. **MethodsX**, v. 5, p. 656 - 668, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016118300943>. Acesso em: 28 jul 2023.

REETZ JR, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. 1 ed. São Paulo: ANDA, 2017. *E-book*.

SALAH, M.; YEHIA, S.; ALI, R., T. Cytogenetic effect of some nanostructure polymers prepared via gamma irradiation on *Vicia faba* plant. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 9, p. 1 - 16, 2022. Disponível em: <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-021-00279-8>. Acesso em: 07 jun 2023.

SAYED, E. G.; OUIS, M. A. Improvement of pea plants growth, yield, and seed quality using glass fertilizers and biofertilizers. **Environmental Technology & Innovation**, v. 26, p. 1 - 13, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422000451>. Acesso em: 09 jun 2023.

SHANWARE, A. S.; KALKAR, S. A.; TRIVEDI, M. M. Potassium solubilisers: occurrence, mechanism and their role as competent biofertilizers. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Nagpur, v. 3, p. 622-629, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Surekha-Kalkar/publication/270219923_Original_Research_Article_Potassium_Solubilisers_Occurrence_Mechanism_and_Their_Role_as_Competent_Biofertilizers/links/54a369460cf267bdb90431f2/Original-Research-Article-Potassium-Solubilisers-Occurrence-Mechanism-and-Their-Role-as-Competent-Biofertilizers.pdf. Acesso em: 18 jul 2021.

SIMPSON, R. J. *et al.* Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. **Plant and Soil**, v. 349, p. 89–120 jun. 2011. DOI: 10.1007 / s11104-011-0880-1. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225382937_Strategies_and_agronomic_interventions_to_improve_the_phosphorus-use_efficiency_of_farming_systems. Acesso em: 09 jun 2021.

STROTMANN, U. *et al.* Development and evaluation of an online CO₂ evolution test and a multicomponent biodegradation test system. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, p. 4621–4628, abr. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.70.8.4621-4628.2004>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/8415527_Development_and_Evaluation_of_an_On

line_CO2_Evolution_Test_and_a_Multicomponent_Biodegradation_Test_System. Acesso em: 02 jul 2021.

SURGUN-ACAR, Y. *et al.* Evaluation of Genotoxic Effects of Commonly Used Fertilizers in *Allium cepa* Root Cells by Comet Assay. **International Journal of Environmental Research and Technology**. v. 2, n. 3, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Serter-Catav/publication/359816465_Evaluation_of_Genotoxic_Effects_of_Commonly_Used_Fertilizers_in_Allium_cepa_Root_Cells_by_Comet_Assay/links/62500f4eef0134206661a0f9/Evaluation-of-Genotoxic-Effects-of-Commonly-Used-Fertilizers-in-Allium-cepa-Root-Cells-by-Comet-Assay.pdf. Acesso em: 04 jul 2023.

TIQUIA, S. M. Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. **Chemosphere**. v. 79, n. 5, p. 506-512, mar. 2010. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.02.040. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20299074/>. Acesso em: 21 jun 2021.

WANG, J.; CHAPMAN, S. J.; YAO, H. Incorporation of ¹³C-labelled rice rhizodeposition into soil microbial communities under different fertilizer applications. **Applied soil ecology**, v. 101, p. 11 - 19, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139316300105>. Acesso em: 10 abr 2023.

WANG, J. L. *et al.* Balanced fertilization over four decades has sustained soil microbial communities and improved soil fertility and rice productivity in red paddy soil. **Science of The Total Environment**, v. 793, p. 1 - 10, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352734421_Balanced_fertilization_over_four_decades_has_sustained_soil_microbial_communities_and_improved_soil_fertility_and_rice_productivity_in_red_paddy_soil. Acesso em: 10 abr 2023.

WANG, Z. B. *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions of chemical fertilizer types in China's crop production. **Journal of Cleaner Production**. v. 141, p. 1267-1274, jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.120>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616314615>. Acesso em: 20 jun 2021.

WEBER, J.; SILVA, T. N. da. A Produção Orgânica no Brasil sob a Ótica do Desenvolvimento Sustentável. **Desenvolvimento em Questão**. v. 19, n. 54, p. 164 - 184, 2021. DOI: 10.21527/2237-6453.2021.54.164-184. Disponível em: <https://revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/11001>. Acesso em: 06 jun 2023.

WYCISZKIEWICZ, M. *et al.* New generation of phosphate fertilizer from bones, produced by bacteria. **Open Chemistry**, v. 13, p. 951 - 958, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280136355_New_generation_of_phosphate_fertilizer_from_bones_produced_by_bacteria. Acesso em: 02 ago 2023.

YE, L. *et al.* Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality. **Scientific reports**. v. 10, p. 1-11, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56954-2>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-56954-2>. Acesso em: 28 jun 2021.

YUWA-AMORNPITAK, T.; CHOOKIETWATANA, K. Bioconversion of waste cooking oil glycerol from cabbage extract to lactic acid by *Rhizopus microsporus*. **Brazilian Journal of Microbiology**. v. 49, p. 178-184, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/bjm/a/VzRWpMRZfp4YZ3YnN5fHKfd/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 05 abr 2023.

ZHANG, X. *et al.* Effects of nitrogen fertilization and root interaction on the agronomic traits of intercropped maize, and the quantity of microorganisms and activity of enzymes in the rhizosphere. **Plant Soil**, v. 368, p. 407 - 417, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-012-1528-5>. Acesso em: 10 abr 2023.

ZHU, Z. *et al.* Soil fertility, microbial biomass, and microbial functional diversity responses to four years fertilization in an apple orchard in North China. **Horticultural plant journal**, v. 6, n. 4, p. 223 - 230, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468014120300613>. Acesso em: 10 abr 2023.

6 Considerações finais

Apesar de liberar nutrientes de forma lenta e gradual, a aplicação de elevadas concentrações do fertilizante vítreo em condições altamente otimizadas de liberação (como nos extratos aquosos) podem causar efeitos fitotóxicos e genotóxicos não desejados ao inibir o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas, além de causar aberrações cromossômicas. Desse modo, a concentração C1 (0,317 g/L) do fertilizante, a qual não apresentou efeito tóxico nas condições mencionadas, mostra-se a mais indicada. Os efeitos ecotóxicos observados podem ser resultado de duas hipóteses principais: uma alta taxa de fósforo e/ou potássio na composição do produto, capaz de inibir a absorção de outros nutrientes pela planta e uma acidificação no pH pelo acúmulo de vários nutrientes no meio.

Em circunstâncias de aplicação do fertilizante diretamente em solo, todas as concentrações (0,317 g/kg; 0,633 g/kg; 1,267 g/kg; 2,534 g/kg; 5,063 g/kg) mostraram-se seguras para aplicação por não apresentar efeito inibidor no desenvolvimento de *L. sativa*, assim como ausência de citogenotoxicidade para *A. cepa*. Para a microbiota, além de não causar toxicidade, houve um estímulo para o crescimento de atividade microbiana, aumentando o número de bactérias e fungos no solo, fator que favorece seu objetivo principal de ampliar a produtividade agrícola.

Portanto, através dos resultados obtidos pode-se concluir que o fertilizante vítreo testado atinge seu objetivo principal de fornecer nutrientes de maneira controlada e gradual para as plantas e sua aplicação pode ser eficiente ao favorecer a atividade agrícola, desde que seja administrado em concentrações ideais de aplicação.

7 Referências

AFTAB, T.; HAKEEM, K. R. **Plant micronutrients: deficiency and toxicity management**. Springer Nature, 2020. E-book.

ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. **Journal of Chemistry**, v. 2019, p. 1 - 14, 2019. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jchem/2019/6730305/>. Acesso em: 28 jul 2023.

ANACLETO, L. R.; ROBERTO, M. M.; MARIN-MORALES, M. A. *Toxicological effects of the waste of the sugarcane industry, used as agricultural fertilizer, on the test system Allium cepa*. **Chemosphere**, v. 173, p. 31-42, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.033>. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/169346>. Acesso em: 14 maio 2021.

ANGELO, L. M.; FRANÇA, D.; FAEZ, R. *Biodegradation and viability of chitosan-based microencapsulated fertilizers*. **Carbohydrate Polymers**, v. 257, p. 117635, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861721000230?via%3Dihub>. Acesso em: 20 mar 2023.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. *Microbial biomass and activity in a Brazilian soil amended with untreated and composted textile sludge*. **Chemosphere**, v. 64, n. 6, p. 1043-1046, ago. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653506000919>. Acesso em: 19 julho 2021.

AYELE, H. S.; ATLABACHEW, M. *Review of characterization, factors, impacts, and solutions of Lake eutrophication: lesson for lake Tana, Ethiopia*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 1-20, jan. 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-12081-4. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348914691_Review_of_characterization_factors_impacts_and_solutions_of_Lake_eutrophication_lesson_for_lake_Tana_Ethiopia. Acesso em: 15 julho 2021.

BAHADUR, I.; MEENA, V. S.; KUMAR, S. Importance and application of potassic biofertilizer in Indian agriculture. **Research Journal of Chemical Sciences**, v. 3, p. 80-85, dez. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Vijay-Meena-2/publication/274081635_Importance_and_Application_of_Potassic_Biofertilizer_in_Indian_Agriculture/links/55f3844108ae63926cf2504a/Importance-and-Application-of-Potassic-Biofertilizer-in-Indian-Agriculture.pdf. Acesso em: 18 julho 2021.

BAI, Z. *et al.* Designing Vulnerable Zones of Nitrogen and Phosphorus Transfers To Control Water Pollution in China. **Environmental Science & Technology**, v. 52 p. 8987 - 8988, 2018. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.8b02651>. Acesso em: 31 mar 2023.

BAO, L. *et al.* China's water pollution by persistent organic pollutants. **Environmental**

Pollution, v. 163, p. 100-108, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749111006798>. Acesso em: 31 mar 2023.

BARTHA, R; PRAMER, D. Features of a flask and method for measuring the persistence and biological effects of pesticides in soil. **Soil Science**, v. 100, p. 68-70, jul. 1965.

BEKETOV, M. A.; LIESS, M. Ecotoxicology and macroecology--time for integration. **Environmental Pollution**, v. 162, p. 247 - 254, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749111006282?via%3Dihub>. Acesso em: 28 jul 2023.

BERTI, A. P.; SILVEIRA, M. J. da; GRASSI, L. E. A.; SILVA, E. M. da S. E. A importância da genética ecotoxicológica. **Revista de Saúde e Biologia**, v. 4, n. 1, p. 52 - 55, 2009. Disponível em: <https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios/article/view/126>. Acesso em: 28 jul 2023.

BENÍCIO, L. P. Panorama do uso de fertilizantes fosfatados no brasil, umarevisão. **Agri-environmental sciences**, v. 8, n. 2, p. 1-12, 20 dez. 2022. Acesso em: 16 março 2023,

BHAT, R.; JÖUDU, I. Emerging issues and challenges in agri-food supply chain. **Sustainable food supply chains**, p. 23 - 37, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128134115000028>. Acesso em: 20 julho 2021.

BORSARI, F. Fertilizantes inteligentes. **Agro DBO**, p.54-57, jun. 2013. Disponível em: http://www.bbagro.com.br/artigos/Tecnologia%20Edi_o%20jun13.pdf. Acesso em: 05 julho 2021.

BROOKS, B. Greening Chemistry and Ecotoxicology Towards Sustainable Environmental Quality. **Green Chemistry**, v. 21, p. 2575 - 2582, 2019. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/GC/C8GC03893G>. Acesso em: 28 jul 2023.

CAMENZIND, T. *et al.* Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests. **Ecological Monographs**, v. 88, n. 1, p. 4-21, 2017. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecm.1279>. Acesso em: 10 abr 2023.

CARVALHO, D. G. Agricultura e aquecimento global: efeitos e mitigação. **Enciclopédia biosfera** - Suplemento Especial, Goiânia, v .5, n. 8, p. 1 -18, 2009. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/SABC/agricultura%20e%20aquecimento.pdf>. Acesso em: 03 abr 2023.

CARVALHO, N. L.; PIVOTO, T. S. Ecotoxicologia: conceitos, abrangência e importância agronômica. **Revista Monografias Ambientais**, v. 2, n. 2, p. 176 - 192, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/2315>. Acesso em: 28 jul 2023.

CARVALHO, N. L.; ZABOT, V. Nitrogênio: nutriente ou poluente?. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 960–974, 2012.

Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/4671>. Acesso em: 21 mar 2023.

CECAGNO, D. *et al.* Acidificação do solo sob fertilização nitrogenada de longo prazo em campo nativo com introdução de azevém. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. v. 18, n. 2, p. 263 - 267, 2019. Disponível em: <https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/10326>. Acesso em: 03 abr 2023.

CESCHIN, S.; BELLINI, A.; SCALICI, M. Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: a review. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 28, p. 4975 - 4988, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-11496-3>. Acesso em: 07 jun 2023.

CHAN-KEB, C. A. *et al.* Acute phytotoxicity of four common pharmaceuticals on the germination and growth of *Lactuca sativa* L. **Applied ecology and environmental research**, v. 20, n. 5, p. 3737-3746, 2022. Acesso em: 26 mar 2023.

CHEN G. *et al.* Physiological and Morphological Responses of Hydroponically Grown Pear Rootstock Under Phosphorus Treatment. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1-14, nov. 2021. Acesso em: 09 março 2023.

CIURLI, A. *et al.* A novel P nanofertilizer has no impacts on soil microbial communities and soil microbial activity. **Applied Soil Ecology**, v. 178, p. 1-6, 2022. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S092913932200186X?token=E8C4A6D15A9676163E14212634CEF5EC182FA80CCCE0D3D8DF5414346682D6750EA70436858D259CABD0A3FDD9651F24&originRegion=us-east-1&originCreation=20230410183329>. Acesso em: 10 abr 2023.

COELHO, A. P. D. *et al.* Genotoxic and antiproliferative potential of extracts of *Echinodorus grandiflorus* and *Sagittaria montevidensis* (Alismataceae). **Caryologia**, v.70, n.1, 82-91, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00087114.2016.1275932?scroll=top&needAccess=true&role=tab>. Acesso em: 04 set 2023.

COLOMBO, J.; RAHAL, P. Alterações Genéticas em Câncer de Cabeça e Pescoço. **Revista Brasileira de Cancerologia**, v. 55, n. 2, p. 165-174, jun. 2009. Disponível em: https://rbc.inca.gov.br/site/arquivos/n_55/v02/pdf/11_revisao_literatura2.pdf. Acesso em: 22 junho 2021.

COMEXSTAT. Exportação e Importação Geral. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>. Acesso em: 05 jun 2023.

COSTA, P. B. *et al.* The effects of different fertilization conditions on bacterial plant growth promoting traits: guidelines for directed bacterial prospection and testing. **Plant and Soil**, v. 368, p. 267 - 280, nov. 2012. DOI: 10.1007/s11104-012-1513-z. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257638980_The_effects_of_different_fertilization_conditions_on_bacterial_plant_growth_promoting_traits_Guidelines_for_directed_bacterial_prospection_and_testing. Acesso em: 16 julho 2021.

COTA-RUIZ, K. *et al.* Copper nanowires as nanofertilizers for alfalfa plants: Understanding nano-bio systems interactions from microbial genomics, plant molecular responses and spectroscopic studies. **Science of the total environment**, v. 742, p. 1-9, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720340948>. Acesso em: 10 abr 2023.

DINCĂ, L. C. *et al.* Fertilization and soil microbial community: a review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1 - 20, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1198>. Acesso em: 10 abr 2023.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Ecological effects test guidelines (OPPTS 850.4200)**: seed germination/root elongation toxicity test public draft. 1996.

EUROSTAT. **Mineral fertiliser consumption remained high in 2020**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220628-1>. Acesso em: 20 mar 2023.

FREITAS, R. E.; MENDONÇA, M. A. A. Expansão Agrícola no Brasil e a Participação da Soja: 20 anos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 3, p. 497 - 516, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/vV6K8XSmRXzn49Khhsbww4D/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 28 jul 2023.

GASQUEZ, J. G. *et al.* Produtividade da agricultura brasileira e os efeitos de algumas políticas. **Revista de política agrícola**, n. 3, p. 83 - 92, 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/82666/1/Produtividade-da-agricultura-brasileira-e-os-efeitos-de-algumas-politicas.pdf>. Acesso em: 28 jul 2023.

GARDUQUE, R. G. *et al.* Synthesis and Characterization of Sodium Carboxymethyl Cellulose/Sodium Alginate/Hydroxypropyl Cellulose Hydrogel for Agricultural Water Storage and Controlled Nutrient Release. **Solid State Phenomena**. v. 304, p. 51–57, 2020. Disponível em: <https://www.scientific.net/SSP.304.51>. Acesso em: 26 mar 2023.

GEISSELER, D.; SCOW, K. M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms—A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 75, p. 54-63, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071714001187>. Acesso em: 10 abr 2023.

GONÇALVES, M. M. C *et al.* Phytotoxicity and cytogenotoxicity of composted tannery sludge. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 27, 34495-34502, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09662-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-09662-8>. Acesso em: 02 jul 2021.

GRANT, W. F. 1982. Chromosome aberration assays in allium: A report of the U.S. environmental protection agency gene-tox program. **Mutation Research**, v. 99, n. 3, p. 273-291, 1982.

GUSTIAR, F. *et al.* Biofortification of calcium on mustard (*Brassica juncea* L.) and lettuce

(*Lactuca sativa*) cultivated in floating hydroponic system. **Buletin Agroteknologi**, v. 1, n. 1, p. 27-36, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342879721_Biofortification_of_calcium_on_mustard_Brassica_junceae_L_and_lettuce_Lactuca_sativa_cultivated_in_floating_hydroponic_system. Acesso em: 26 mar 2023.

GÜLER, S. Developments on fertilizer consumption of the world and Turkey. **Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi**, v. 21, n. 2, p. 243 - 248, 2006. Disponível em: https://dergipark.org.tr/en/pub/omuanajas/issue/20230/214295#article_cite. Acesso em: 28 jul 2023.

HARA, R. V.; MARIN-MORALES, M. A. In vitro and in vivo investigation of the genotoxic potential of waters from rivers under the influence of a petroleum refinery (São Paulo State e Brazil). **Chemosphere**, v. 174, p. 321 - 330, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653517301583?via%3Dihub>. Acesso em: 04 set 2023.

HAZRA, G. Different types of eco-friendly fertilizers: An overview. **Sustainability in Environment**. v. 1, n. 1, p. 54 - 70, 2016. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/268085799.pdf>. Acesso em: 20 jun 2023.

JAMIL, I. *et al.* Agricultural Innovation: A comparative analysis of economic benefits gained by farmers under climate resilient and conventional agricultural practices. **Land Use Policy**. v. 108, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105581>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837721003045>. Acesso em: 08 julho 2021.

JANK, M. S.; NASSAR, A. M.; TACHINARDI, M. H. Agronegócio e comércio exterior brasileiro. **Revista USP**. São Paulo, n. 64, p. 14 - 27, fev. 2005. Disponível em: <http://www.periodicos.usp.br/revusp/article/download/13387/15205>. Acesso em: 28 junho 2021.

JORGE, M. H. A. *et al.* Uso de hidrogel nanocompósito na produção de mudas de tomate e pimentão. **Embrapa Hortaliças**. Brasília, p. 1-24, ago. 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/201160/1/CT-167-20-08-2019-2.pdf>. Acesso em: 30 junho 2021.

KALWANI, M. *et al.* Effects of nanofertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives. **Chemosphere**, v. 287, p. 1 - 13, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521025790>. Acesso em: 10 abr 2023.

KURÁS, M. *et al.* Changes in chromosome structure, mitotic activity and nuclear DNA content from cells of *Allium* Test induced by barck water extract of *Uncaria tomentosa* (Willd.) DC. **Chemosphere**. v. 107, p. 211-221, 2006. DOI: 10.1016/j.jep.2006.03.018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16793229/>. Acesso em: 25 jun 2021.

LABBILTA, T. *et al.* Innovative Formulations of Phosphate Glasses as Controlled-Release

Fertilizers to Improve Tomato Crop Growth, Yield and Fruit Quality. **Molecules**. v. 26, p. 1 - 21, 2021a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/13/3928>. Acesso em: 14 jun 2023.

LABBILTA, T. *et al.* Elaboration and characterization of vitreous fertilizers and study of their impact on the growth, photosynthesis, and yield of wheat (*Triticum durum* L.). **Materials**. v. 14, n.5, p. 1 - 19, 2021b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/5/1295>. Acesso em: 20 jun 2023.

LEME, D. M.; ANGELIS, D. F.; MARIN-MORALES, M. A. Action mechanisms of petroleum hydrocarbons present in waters impacted by an oil spill on the genetic material of *Allium cepa* root cells. **Aquatic Toxicology**. v. 88, p. 214 - 219, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2008.04.012>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18556073/>. Acesso em: 12 jul 2021.

LEME, D. M.; MARIN-MORALES, M. A. *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application. **Mutation Research/Reviews in Mutation Research**. Amsterdam, v. 682, n. 1, p. 71-81, jul. 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/19821>. Acesso em: 22 jun 2021.

LESSA, L. R.; SILVA, M. C. C.; CARIELLO, F. M. R. Fundamentos e aplicações do *Allium cepa* L. como bioindicador de mutagenicidade e citotoxicidade de plantas medicinais. **Revinter**. v. 10, n. 03, p. 39 - 48, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.22280/revintervol10ed3.294>. Disponível em: <http://autores.revistarevinter.com.br/index.php?journal=toxicologia&page=article&op=view&path%5B%5D=294>. Acesso em: 03 jul 2021.

LI, Y. *et al.* An Analysis of China's Fertilizer Policies: Impacts on the Industry, Food Security, and the Environment. **Journal of Environment Quality**. v. 42(4), p. 972-981, 2013. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/jeq2012.0465>. Acesso em: 25 mar 2023.

LIMA-MONCAYO, A. O.; ZAMBRANO-GAVILANES, F. Uso de fertilizantes orgânicos en la producción de cucurbitáceas: revisión de literatura. **Paideia XXI**. v. 13, n. 1, p. 1 - 25, 2023. Disponível em: <http://revistas.urp.edu.pe/index.php/Paideia/article/view/5671/7769>. Acesso em: 07 jun 2023.

LOPES, R. M. T.; BIDOIA, E. D. Evaluation of the biodegradation of different types of lubricant oils in liquid medium. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. v. 52, p. 1285 - 1290, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000500028>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/CDYgNwHsHP5rH8rD8VYVwFR/?lang=en#>. Acesso em: 03 ago 2021.

LOURENÇO, V. A. *et al.* Phytotoxicity test of effluent and sludge from a rice parboiling industry. **Ciência E Natura**, v. 42, p. 1 - 11, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/39393>. Acesso em: 28 jul 2023.

MACAR, T. K. Investigation of cytotoxicity and genotoxicity of abamectin pesticide in *Allium*

cepa L. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 28, p. 2391–2399, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10708-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-10708-0#citeas>. Acesso em: 16 jul 2021.

MACHADO, R. C. *et al.* Internal standardization as a strategy to overcome non-spectral interferences in the determination of As, Cd and Pb in mineral fertilizers by synchronous vertical dual view (SVDV) ICP OES. **Analytical Methods**, v. 12, n. 1, p. 39 – 45, 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/AY/C9AY02343G>. Acesso em: 05 jun 2022.

MACIEL, L. M.; TUNES, L. V. M. A importância dos fertilizantes para a agricultura. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v.7, n. 6, p. 58647-58658, jun. 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/31331/pdf>. Acesso em: 24 jun 2021.

MEENA, R. H.; JAT, G.; JAIN, D. Impact of foliar application of different nano-fertilizers on soil microbial properties and yield of wheat. **Journal of Environmental Biology**, v. 42, p. 302 - 308, 2021. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/2961f4541a36e30d8b63cc222ba74b08/1?pq-origsite=gscholar&cbl=636374>. Acesso em: 10 abr 2023.

MELLO, G. S. L. *et al.* Viabilidade da aplicação do método respirométrico de bartha para determinação da biodegradação de poluentes ou resíduos em latossolos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 1, p. 71 - 78, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/wpFF68MCQypDBtXZjkp56Yh/?format=html>. Acesso em: 28 jul 2023.

MENDONÇA, V. *et al.* Substratos e doses de fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de açaí. **Revista Ciências Agrárias**. Belém, n. 46, p. 275-285, 2006. Disponível em: <http://btcc.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/272/170>. Acesso em: 23 junho 2021.

MIKULA, K. *et al.* Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review. **Science of The Total Environment**. v. 712, p. 1 - 9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136365>. Acesso em: 09 mar 2023.

MOURA, A. C. A. **Estudos de síntese e solubilidade de vidros óxidos multicomponentes para aplicação como fertilizantes**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (graduação em química) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

NADEEM, F. *et al.* Role of macronutrients and micronutrients in the growth and development of plants and prevention of deleterious plant diseases – A comprehensive review. **International Journal of Chemical and Biochemical Sciences**. v. 13, p. 31-52, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329044150_Role_of_Macronutrients_and_Micronutrients_in_the_Growth_and_Development_of_Plants_and_Prevention_of_Deleterious_Plant_Diseases_-_A_Comprehensive_Review. Acesso em: 04 jul 2021.

NICCHIO, B. *et al.* Efeito da aplicação Foliar de Si, P e K no desenvolvimento, produção e

qualidade de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá (PR). v. 14, n. 2, p. 1-14, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Bruno-Nicchio/publication/350886724_Efeito_da_aplicacao_Foliar_de_Si_P_e_K_no_desenvolvimento_producao_e_qualidade_de_soqueira_de_cana-de-acucar/links/60784842881fa114b4034347/Efeito-da-aplicacao-Foliar-de-Si-P-e-K-no-desenvolvimento-producao-e-qualidade-de-soqueira-de-cana-de-acucar.pdf. Acesso em: 31 mar 2023.

NICOLELLA, A. C.; DRAGONE, D. S.; BACHA, C. J. C. Determinantes da Demanda de Fertilizantes no Brasil no período de 1970 a 2002. **Revista de economia e sociologia rural**, v. 43, n. 1, p. 81 - 100, 2005. Disponível em: <https://www.revistasober.org/journal/resr/article/doi/10.1590/S0103-20032005000100005>. Acesso em: 28 jul 2023.

OECD (Observatory of Economic Complexity). **Fertilizers - Product Trade, Exporters and Importers**, 2021a. Disponível em: [https://oec.world/en/profile/hs/fertilizers#:~:text=Exports%20In%202020%20the%20top,and%20France%20\(%241.83B\)>](https://oec.world/en/profile/hs/fertilizers#:~:text=Exports%20In%202020%20the%20top,and%20France%20(%241.83B)>). Acesso em: 20 mar 2023.

OECD (Observatory of Economic Complexity). **Fertilizers - Product Trade, Exporters and Importers**, 2021b. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/hs/fertilizers#:~:text=Exports>. Acesso em: 20 mar 2023.

OLIVEIRA, M. P.; MALAGOLLI, G. A.; CELLA, D. Mercado de fertilizantes: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 489 - 498, 2019. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/606>. Acesso em: 7 abr 2022.

PANTANO, G. *et al.* Toxicity of the sawdust used for phosphorus recovery in a eutrophic reservoir: experiments with *Lactuca sativa* and *Allium cepa*. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 28, n. 14, p. 18276-18283, jan. 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/209863>. Acesso em: 03 jul 2021.

PITOMBO, L. M. *et al.* Methodology for soil respirometric assays: Step by step and guidelines to measure fluxes of trace gases using microcosms. **MethodsX**, v. 5, p. 656 - 668, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016118300943>. Acesso em: 28 jul 2023.

PRIAC, A.; BADOT, P. M.; CRINI, G. Treated wastewater phytotoxicity assessment using *Lactuca sativa*: focus on germination and root elongation test parameters. **Comptes Rendus Biologies**. v. 340, n. 3, p. 188-194, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crv.2017.01.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631069117300033>. Acesso em: 29 jun 2021.

PRIMO, T. A. R. da C. *et al.* Glyphosate concentration and phytotoxicity in *Lactuca sativa* Buttercrunch. **Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental**, v. 24, p. 1 - 14, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/62665>. Acesso em:

28 jul 2023.

QU, J.; FAN, M. The Current State of Water Quality and Technology Development for Water Pollution Control in China. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. v. 40, n. 6, p. 519 - 560, 2010. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380802451953>. Acesso em: 31 mar 2023.

RAMTEKE, A. *et al.* Study of germination effect of fertilizers like urea NPK and biozyme on some vegetable plants. **Der Chemica Sinica**, v. 4, n. 3, p. 22 - 26, 2013. Disponível em: <https://www.imedpub.com/articles/study-of-germination-effect-of-fertilizers-like-urea-npk-and-biozyme-on-somevegetable-plants.pdf>. Acesso em: 21 mar 2023.

REETZ J. R. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. 1 ed. São Paulo: ANDA, 2017. *E-book*.

REHMAN, A. *et al.* Fertilizer consumption, water availability and credit distribution: Major factors affecting agricultural productivity in Pakistan. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 18, p. 269 - 274, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658077X17301625>. Acesso em: 28 jul 2023.

RUDMIN, M. *et al.* An investigation of plant growth by the addition of glauconitic fertilizer. **Applied Clay Science**, v. 180, p. 1 - 8, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131719302364>. Acesso em: 28 jul 2023.

SAAB, A., PAULA, R. O mercado de fertilizantes no Brasil diagnósticos e propostas de políticas. **Revista de Política Agrícola**, v. 17, p. 5-24, Jun. 2008. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/404/355>. Acesso em: 21 mar 2023.

SAHA, G.; DAS, T. Glass Fertilizer - A historical overview. **Science and Culture**. v. 89, p. 107 - 109, 2023. Disponível em: https://scienceandculture-isna.org/uploads/latestIssue/06_Gouranga_Saha.pdf. Acesso em: 20 jun 2023.

SAVCI, S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. **APCBEE Procedia**, v. 1, p. 287 - 292, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212670812000486>. Acesso em: 27 mar 2023.

SHABALA, S.; CUIN, T. A. Potassium transport and plant salt tolerance. **Physiologia plantarum**, v. 133, n. 4, p. 651 - 669, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1399-3054.2007.01008.x>. Acesso em: 27 mar 2023.

SHAHINI, E. *et al.* The supply shock in organic fertilizers for agriculture caused by the effect of Russia-Ukraine war. **Scientific Horizons**, v. 25, n. 2, p. 97 - 103, 2022. Disponível em: <https://sciencehorizon.com.ua/en/journals/tom-25-2-2022/shok-propozitsiyi-organichnikh-dobriv-dlya-silskogo-gospodarstva-sprichineny-rosiysko-ukrayinskoyu-viynoyu>. Acesso em: 27 mar 2023.

SHANWARE, A. S.; KALKAR, S. A.; TRIVEDI, M. M. Potassium solubilisers: occurrence, mechanism and their role as competent biofertilizers. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**. Nagpur, v. 3, p. 622-629, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Surekha-Kalkar/publication/270219923_Original_Research_Article_Potassium_Solubilisers_Occurrence_Mechanism_and_Their_Role_as_Competent_Biofertilizers/links/54a369460cf267bdb90431f2/Original-Research-Article-Potassium-Solubilisers-Occurrence-Mechanism-and-Their-Role-as-Competent-Biofertilizers.pdf. Acesso em: 18 jul 2021.

SAYED, E. G.; OUIS, M. A. Improvement of pea plants growth, yield, and seed quality using glass fertilizers and biofertilizers. **Environmental Technology & Innovation**, v. 26, p. 2 - 13, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422000451>. Acesso em: 28 jul 2023.

SILVA, P.; MATOS, M. Assessment of the impact of Aluminum on germination, early growth and free proline content in *Lactuca sativa* L. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 131, p. 151 - 156, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651316301762>. Acesso em: 02 ago 2023.

SIMPSON, R. J. *et al.* Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. **Plant and Soil**. v. 349, p. 89 – 120, jun. 2011. DOI: 10.1007/s11104-011-0880-1. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225382937_Strategies_and_agronomic_interventions_to_improve_the_phosphorus-use_efficiency_of_farming_systems. Acesso em: 09 jun 2021.

SOLANKEY, S. S. *et al.* **Urban Horticulture: Necessity of the Future**. Londres: BoD – Books on Demand, 2020. *E-book*.

SOMMAGGIO, L. R. D. *et al.* Ecotoxicological and microbiological assessment of sewage sludge associated with sugarcane bagasse. **Ecotoxicology and environmental safety**. v. 147, p. 550-557, jan. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.009>. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/175165>. Acesso em: 02 jul 2021.

SONG, U.; KIM, J. Zinc oxide nanoparticles: a potential micronutrient fertilizer for horticultural crops with little toxicity. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**. v. 61, p. 625–631, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13580-020-00244-8#citeas>. Acesso em: 24 mar 2023.

SPARDA, A. *et al.* Real-Time Soil CO₂ Respiration Rate Determination and the Comparison between the Infrared Gas Analyzer and Microrespirometer (MicroRes®) Methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 2, p. 214 - 221, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2016.1254235>. Acesso em: 28 jul 2023.

STEWART, W. M.; ROBERTS, T. L. Food Security and the Role of Fertilizer in Supporting it. **Procedia Engineering**, v. 46, p. 76 - 82, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812045110>. Acesso em: 28 jul 2023.

STROTMANN, U. *et al.* Development and evaluation of an online CO₂ evolution test and a multicomponent biodegradation test system. **Applied and Environmental Microbiology**. v. 70, p. 4621 - 4628, abr. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.70.8.4621-4628.2004>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/8415527_Development_and_Evaluation_of_an_On_line_CO2_Evolution_Test_and_a_Multicomponent_Biodegradation_Test_System. Acesso em: 02 jul 2021.

TARGA, H. J.; RABELLO-GAY, M. N. Mutagênese, teratogênese, carcinogênese e o uso de alguns praguicidas. **Revista do Serviço Público**. v. 40, n. 4, p. 193 - 200, 1983. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/3768>. Acesso em: 17 jul 2021.

TETTEH, R. N. Chemical soil degradation as a result of contamination: A review. **Journal of Soil Science and Environmental Management**. v. 6, p. 301 - 308, mai. 2015. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/JSSEM/article-full-text-pdf/A3847D356736>. Acesso em: 08 jun 2021.

TIQUIA, S. M. Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. **Chemosphere**. v. 79, n. 5, p. 506 - 512, mar. 2010. DOI: 10.1016 / j.chemosphere.2010.02.040. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20299074/>. Acesso em: 21 jun 2021.

TONGWANE, M. I.; MOELETSI, M. E. A review of greenhouse gas emissions from the agriculture sector in Africa. **Agricultural Systems**, v. 166, p. 124 - 134, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X17309423>. Acesso em: 28 jul 2023.

WANG, J.; CHAPMAN, S. J.; YAO, H. Incorporation of ¹³C-labelled rice rhizodeposition into soil microbial communities under different fertilizer applications. **Applied soil ecology**, v. 101, p. 11 - 19, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139316300105>. Acesso em: 10 abr 2023.

WANG, J. L. *et al.* Balanced fertilization over four decades has sustained soil microbial communities and improved soil fertility and rice productivity in red paddy soil. **Science of The Total Environment**, v. 793, p. 1 - 10, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352734421_Balanced_fertilization_over_four_decades_has_sustained_soil_microbial_communities_and_improved_soil_fertility_and_rice_productivity_in_red_paddy_soil. Acesso em: 10 abr 2023.

WANG, Z. B. *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions of chemical fertilizer types in China's crop production. **Journal of Cleaner Production**. v. 141, p. 1267 - 1274, jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.120>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616314615>. Acesso em: 20 jun 2021.

YE, L. *et al.* Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality. **Scientific reports**. v. 10, p. 1 - 11, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56954-2>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-56954-2>. Acesso em: 28 jun 2021.

YUWA-AMORNPITAK, T.; CHOOKIETWATANA, K. Bioconversion of waste cooking oil glycerol from cabbage extract to lactic acid by *Rhizopus microsporus*. **Brazilian Journal of Microbiology**. v. 49, p. 178–184, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/bjm/a/VzRWpMRZfp4YZ3YnN5fHKfd/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 05 abr 2023.

ZHANG, Y. *et al.* Optimizing phosphate fertilizer application to reduce nutrient loss in a mustard (*Brassica juncea* var. *tumida*)-maize (*Zea mays* L.) rotation system in Three Gorges Reservoir area. **Soil and Tillage Research**. v. 190, p. 78 - 85, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.03.001. Disponível em : https://www.researchgate.net/publication/331701341_Optimizing_phosphate_fertilizer_application_to_reduce_nutrient_loss_in_a_mustard_Brassica_juncea_var_tumida-maize_Zea_mays_L_rotation_system_in_Three_Gorges_Reservoir_area. Acesso em: 14 jul 2021.

ZHOU, K., *et al.* Phosphorus recovery from municipal and fertilizer wastewater: China's potential and perspective. **Journal of Environmental Sciences**. v. 52, p. 151 - 159, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100107421630119X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 mar 2023.

ZHU, Z. *et al.* Soil fertility, microbial biomass, and microbial functional diversity responses to four years fertilization in an apple orchard in North China. **Horticultural plant journal**, v. 6, n. 4, p. 223 - 230, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468014120300613>. Acesso em: 10 abr 2023.

ZUCCONI, F.; MONACO, A.; FORTE, M. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. **Elsevier Applied Science**, Nova Iorque, p. 73 - 88, 1985.