



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônoma



RAYAN NASCIMENTO TEIXEIRA

**BIOPOLÍMEROS FERTI-LIBERADORES: UMA PROPOSTA DE RECIPIENTE
PARA O CULTIVO DE MUDAS DE ANTÚRIOS**

ARARAS

2024



Universidade Federal de São Carlos
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Curso de Engenharia Agrônoma



RAYAN NASCIMENTO TEIXEIRA

**BIOPOLÍMEROS FERTI-LIBERADORES: UMA PROPOSTA DE RECIPIENTE
PARA O CULTIVO DE MUDAS DE ANTÚRIOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Agrônoma – CCA – UFSCar para a obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza

Coorientadora: Profa. Dra. Roselena Faez

ARARAS

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tem me sustentado e capacitado durante a graduação me concedendo força, sabedoria e conhecimento para chegar até aqui.

A minha família, principalmente aos meus pais, Gabriel e Stela, que confiaram em minha capacidade e me apoiaram nos momentos mais difíceis. À minha namorada, Isabella, que sempre me apoiou e incentivou a continuar em frente;

Aos meus Avós, José e Sarlete, que desde pequeno me incentivaram a percorrer meus sonhos, ensinando que mesmo o caminho estando cheios de desafios, ele deve ser atravessado de cabeça erguida. Também agradeço a meus tios e tias.

Aos meus amigos de graduação, que passaram junto a mim por desafios enormes durante o caminho da graduação, que no fim superamos, em especial: Ana Caroline de Melo, Gustavo Henrique Allegre, Luiz Gustavo Castro Guidetti, Jeferson Costa Pereira, Jackeline Santos e João Pedro Martinelli;

Ao meu professor e orientador, Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza, que me aceitou em seu grupo de pesquisa Engenharia de Água, Solo e Ambiente (EASA), proporcionando experiências e resolução de problemas, me capacitando como recurso humano com conhecimentos inestimáveis;

A minha coorientadora, Profa. Dra. Roselena Faez, que me apoiou tecnicamente e proporcionou seu laboratório de pesquisa de materiais poliméricos e biossorventes.

Ao grupo de pesquisa Engenharia de Água, Solo e Ambiente (EASA), onde pude conhecer pessoas maravilhosas e companheiras, que durante todo o percurso proporcionaram experiências de vida, conhecimentos e apoio, em especial: Alessandra, Priscila, Juliana, Amanda, Jeferson, Viviane e Mariana;

A FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), que financiou o projeto, proporcionando alimentar o campo das ciências agrárias com novas informações valiosas;

Gostaria de reforçar meu agradecimento a todos que participaram dessa caminhada e que de alguma forma contribuíram para meu crescimento como ser humano, e que nunca serão esquecidos.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

A gestão inapropriada dos resíduos plásticos usados na agricultura associado à alta necessidade de fertilização do solo tem acarretado diversos impactos negativos ao ambiente. Alternativas para reduzir estes problemas vem sendo realizadas com materiais que utilizem eficientemente o fertilizante e sem geração de resíduos. Neste sentido, propõe-se neste trabalho a obtenção e otimização de um filme contendo os polímeros naturais alginato (Alg), carragena (Kc) e celulose nanofibrilada (CNF), acrescidos de macro e micronutrientes, variando a concentração dos fertilizantes para $0,4 \text{ dS m}^{-1}$; $0,8 \text{ dS m}^{-1}$; $1,2 \text{ dS m}^{-1}$ e $1,6 \text{ dS m}^{-1}$, de acordo com a recomendação nutricional para a cultura do antúrio. Pretende-se avaliar as propriedades térmicas, estruturais, morfológicas, bem como a biodegradação e o desempenho em campo como recipiente para propagação de plantas. Os filmes envoltos foram obtidos por “casting” e as propriedades de liberação do nutriente e biodegradação foram avaliadas e inter-relacionadas com a estrutura química. A biodegradação foi determinada pelo método respirométrico de Bartha e Pramer em laboratório, e a liberação de fertilizantes em campo foi desenvolvida dentro de uma estufa agrícola, sendo determinada por análise química do tecido vegetal e substrato. A eficiência de absorção dos nutrientes foi avaliada por análise biométrica das mudas de antúrio em campo, mensurando altura, diâmetro da folha maior, número de folhas, massa fresca e seca em intervalos de 30 dias (30, 60 e 90 dias). Os dados obtidos foram submetidos ao tratamento estatístico pela análise de variância (ANOVA), com posterior comparações de médias pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade, onde a maior concentração de fertilizantes com $1,6 \text{ dS m}^{-1}$ demonstrou-se como melhor tratamento de acordo com as análises biométricas. Conclui-se que o material desenvolvido apresentou características físicas, como resistência e biodegradabilidade, para armazenar e disponibilizar fertilizantes, representando uma fonte de inovação para a produção de mudas na agricultura.

Palavras-chave: Agricultura sustentável; materiais biodegradáveis; fertilizantes; propagação vegetal.

ABSTRACT

The improper management of plastic waste in agriculture, coupled with the high demand for soil fertilization, has resulted in significant adverse environmental impacts. Efforts to address these issues involve the development of materials that efficiently utilize fertilizers while minimizing waste generation. This study proposes the formulation and optimization of a film incorporating natural polymers such as Alginate (Alg), Carrageenan (Kc), and nanofibrillated cellulose (CNF), supplemented with macro and micronutrients. The fertilizer concentrations vary at 0.4 dS m^{-1} , 0.8 dS m^{-1} , 1.2 dS m^{-1} , and 1.6 dS m^{-1} , aligning with nutritional recommendations for anthurium cultivation. The primary objectives are to assess the thermal, structural, and morphological properties of the film and to evaluate its biodegradation and performance as a plant propagation container in the field. Films were produced through casting, and their nutrient release and biodegradation properties were systematically analyzed in relation to the chemical structure. Laboratory-based biodegradation assessments utilized the Bartha and Pramer respirometric method, while field-based fertilizer release was conducted within an agricultural greenhouse through chemical analysis of plant tissue and substrate. The efficiency of nutrient absorption was gauged through biometric analyses of anthurium seedlings in the field, measuring height, diameter of the largest leaf, number of leaves, fresh and dry mass at 30-day intervals (30, 60, and 90 days). Statistical treatment involved analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey tests at a 5% significance level. The results indicate that the highest fertilizer concentration, 1.6 dS m^{-1} , emerged as the optimal treatment based on biometric analyses. In conclusion, the developed material exhibits physical characteristics, including resilience and biodegradability, making it suitable for storing and efficiently providing fertilizers. This innovation represents a valuable contribution to seedling production in agriculture, addressing environmental concerns associated with plastic waste.

Keywords: Sustainable agriculture; biodegradable materials; fertilizers; plant propagation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes tipos de estrutura química da carragena.	11
Figura 2. Estrutura de alginato. Ácidos α -L-gulurônicos (G) e β -D-manurônicos (M).	12
Figura 3. Estrutura química da celulose.	12
Figura 4. Esquematização da estrutura molecular da celulose.	14
Figura 5. Molde do compósito.	17
Figura 6. Compósito comparado ao Ellepot.	17
Figura 7. Vista em corte de um Respirômetro.	19
Figura 8. Vista horizontal dos respirômetros com Ellepot.	21
Figura 9. Parâmetros analisados em intervalos de 30 dias (30, 60 e 90 dias) para os diferentes tratamentos em plantas de antúrios.	23
Figura 10. Biodegradação em CO ₂ (mg) diária no substrato e no solo.	25
Figura 11. Compósito após a biodegradação.	26
Figura 12. Imagens MEV dos compósitos após biodegradação.	27
Figura 13. Gráficos FTIR.	29
Figura 14. Gráfico DSC.	30
Figura 15. Gráfico de termogravimetria dos compósitos e gráfico derivativo.	31
Figura 16. Biodegradação do Ellepot em substrato e solo. 32	
Figura 17. Condutividade em água ultrapura e visualização do experimento.	33
Figura 18. Degradação dos compósitos em campo.	34
Figura 19. Altura da planta em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.	35
Figura 20. Diâmetro da folha maior em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.	37
Figura 21. Número de folhas em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.	39
Figura 22. Massa fresca em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.	41
Figura 23. Massa seca em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVO	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 Antúrio (<i>Anturium andraeanum</i> Linl.)	10
3.2 Polímeros naturais	11
3.3 Celulose	13
3.4 Agricultura e Polímeros	14
3.5 Ellepot®	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1 Etapa 1 – Estudos laboratoriais	16
4.1.1 Estrutura Experimental	16
4.1.2 Material	16
4.1.3 Preparo e otimização dos filmes/compósitos	16
4.1.4 Modelagem para uso dos filmes como recipiente de para propagação vegetal	17
4.1.5 Biodegradabilidade dos compósitos/filmes	18
4.1.6 Avaliação das características físicas dos compósitos/filmes	20
4.1.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	20
4.1.6.2 Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	20
4.1.6.3 Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC)	20
4.1.6.4 Análise Termogravimétrica (TGA)	20
4.1.7 Biodegradação do Ellepot	21
4.1.8 Análise de liberação em água	21
4.2 Etapa 2 – Estudos de Campo	22
4.2.1 Delineamento experimental	22
4.2.2 Análise dos materiais em campo	22
4.2.3 Análise Estatística dos dados	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 Etapa 1	24
5.1.1 Biodegradação dos compósitos/filmes	24
5.1.2 Avaliação das características físicas dos compósitos/filmes	26
5.1.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	26
5.1.2.2 Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	27
5.1.2.3 Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC)	29
5.1.2.4 Análise Termogravimétrica (TGA)	30
5.1.3 Biodegradação do Ellepot	31
5.1.4 Análise de liberação em água	32
5.2 Etapa 2	33
5.2.1 Análise biométrica dos antúrios em campo	33
5.2.2 Análise química do substrato e tecido vegetal	44
6. CONCLUSÃO	44
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

Atualmente têm-se procurado reverter as ações antrópicas que são responsáveis por alterações preocupantes no ambiente. Uma das maiores preocupações é a gestão inadequada de resíduos plásticos (IPEA, 2018). Segundo o Fundo Mundial Para A Natureza – WWF (2019), o Brasil é o 4º país com maior geração de resíduos plásticos do mundo, 11,3 milhões de toneladas são gerados e apenas 145 mil toneladas são recicladas. Ainda, de acordo com a Abiplast (2021) a agricultura é responsável pelo consumo de 3,2% do total da produção de plásticos.

Além do descarte incorreto dos resíduos plásticos no campo, outro ponto preocupante é o uso exacerbado de fertilizantes, estes podem causar danos ambientais devido à alta concentração no solo que através da lixiviação podem contaminar corpos d'água (REETZ, 2017). Neste sentido, medidas sustentáveis para que se atinja os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estão sendo tomadas e tem ganhado apoiadores ao redor do mundo.

No entanto, um grande problema para o cultivo em solos tropicais como no Brasil é a baixa retenção dos nutrientes e alta condutividade hidráulica que se tornam suscetíveis à lixiviação e/ou escoamento ocasionando perdas de até 80 % do fertilizante aplicado, tornando-se necessário maiores quantidades em cada aplicação (SILVA et al., 2013).

Diante da alta necessidade nutricional ou de fertilização do solo atrelado a busca pelo desenvolvimento de um recipiente que minimize custos e ao mesmo tempo não agrida o ambiente, uma possível solução para a resolução desta problemática é a utilização de recipientes compostos por materiais biodegradáveis que possuam liberação controlada de fertilizantes.

O desenvolvimento de compósitos a base de polímeros naturais tem sido estudado para uso como recipientes. São geralmente formados por polissacarídeos capazes de formar uma matriz contínua (SILVA et al., 2020). Embora existam recipientes degradáveis e/ou retornáveis, nenhum deles contém em sua estrutura os nutrientes necessários para o desenvolvimento das mudas.

A liberação controlada é uma técnica que permite a racionalização do fertilizante através de uma camada polimérica que o envolve, onde a liberação dos nutrientes ocorre de forma gradativa através de ação mecânica, intemperismo e ataques químicos, ações osmóticas e liberação total após degradação (SANTOS, 2019). A liberação controlada de nutrientes é uma realidade hoje nos viveiros, porém as cápsulas utilizadas atualmente são provenientes de polímeros não biodegradáveis e apresentam alto custo (MEZZOMO, 2016).

Dessa forma, o antúrio se torna uma cultura promissora para realização de uma pesquisa para buscar uma solução aos fatos apresentados, visto que o Brasil possui um dos maiores

parques mundiais produtores de mudas, fora da Holanda. Segundo o Ibraflor (2022), o mercado mundial de flores e plantas ornamentais, considerando-se toda a produção e o consumo dos países, é avaliado em mais de US\$ 70 bilhões anuais.

O presente trabalho foi realizado com o intuito de obter um filme/compósito cujas propriedades sejam resistência, biodegradabilidade e liberação de fertilizante. Utilizando polímeros naturais, Alginato, Carragena e Celulose como materiais base, adicionando fertilizantes (macro e micronutrientes) de acordo com a recomendação nutricional do antúrio, buscando inovação e sustentabilidade na agricultura.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é propor um filme composto por Alg/Kc/CNF que possuam características físicas, biodegradabilidade e uma taxa de liberação controlada de fertilizantes otimizados para usocomo recipiente para propagação de plantas..

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Antúrio (*Anturium andraeanum* Linl.)

Antúrio é um gênero pertencente à família Araceae e possui mais de 600 espécies. Todas as espécies são ornamentais e destacam-se pela beleza das folhagens, tamanho e colorido de suas “flores”. Popularmente, o conjunto formado por uma folha modificada (espata) e uma inflorescência tipo espiga (espádice) é conhecida como “flor” (TOMBOLATO et al., 2004).

O antúrio produz flores comerciais que emergem da base de cada nova folha durante o ano todo. As plantas ornamentais tropicais estão cada vez mais presentes no mercado nacional e internacional, principalmente, pela beleza, suavidade, formas, variedades de cores, aromas e rusticidade no cultivo. Flores sempre estão presentes nos momentos especiais de milhares de pessoas, sendo utilizadas como adornos, enfeitando casas, jardins e os mais variados ambientes (NOMURA et al., 2009).

O antúrio é considerado uma das flores de maior valor unitário. Na Ceagesp - Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo, o preço médio da dúzia, em abril de 2022, mantém-se entre R\$ 33,00 e R\$ 35,00.

No caso de produção comercial das flores, é comum utilizar apenas um suporte para a planta, que passa a receber os nutrientes necessários para o desenvolvimento a partir de uma solução diluída no sistema de irrigação. Para garantir exemplares idênticos aos originais, laboratórios de cultura de tecidos ou micropropagação produzem milhares de mudas a partir de material selecionado, uniforme e livre de doenças (SILVA et al., 2019).

Neste processo é comum a utilização de recipientes para a formação das mudas para posterior transplante em local definitivo com raízes sem solo. Existem diversos materiais que compõem os recipientes e seu custo é um importante componente dentro dos custos de produção.

3.2 Polímeros naturais

Os polímeros naturais vêm sendo muito estudados nos últimos anos e sua aplicação na agricultura tem ganhado destaque devido às suas excelentes características. A Kc e o Alg tem sido utilizado para aplicações em materiais com propriedades de liberação controlada de fertilizantes com diversos benefícios como redução de perdas por lixiviação e como condicionador do solo, ou seja, melhorando as características físico-químicas e biológicas (BOTARO E RODRIGUES, 2021). Alg e Kc são biopolímeros marinhos de fonte abundante e renovável, apresentam bom custo-benefício e biodegradabilidade, além de possuírem propriedades mecânicas próximas aos polímeros de origem não renovável (MENG et al., 2018).

A Kc é encontrada em algumas espécies de algas marinhas vermelhas da classe Rhodophyceae (NECAS E BARTOSIKOVA, 2013). Assim como o Alg, a Kc é um polissacarídeo com grupos de éster sulfato de cadeia linear constituído de D-galactose e 3,6-anidro-galactose (3,6-AG), alternados e conectados através de ligações α -1,3 e β -1,4-glicosídica (ZIA et al., 2017). A posição em que o grupo éster sulfato encontra-se ligado assim como a quantidade desse grupo diferencia os tipos de Kc como kappa, iota e lambda (Figura 1). A força de gelificação está relacionada à quantidade do grupo éster sulfato presente na estrutura, assim como a temperatura de solubilização, sendo o menor nível deste grupo relacionado com maior força de gelificação (NECAS E BARTOSIKOVA, 2013).

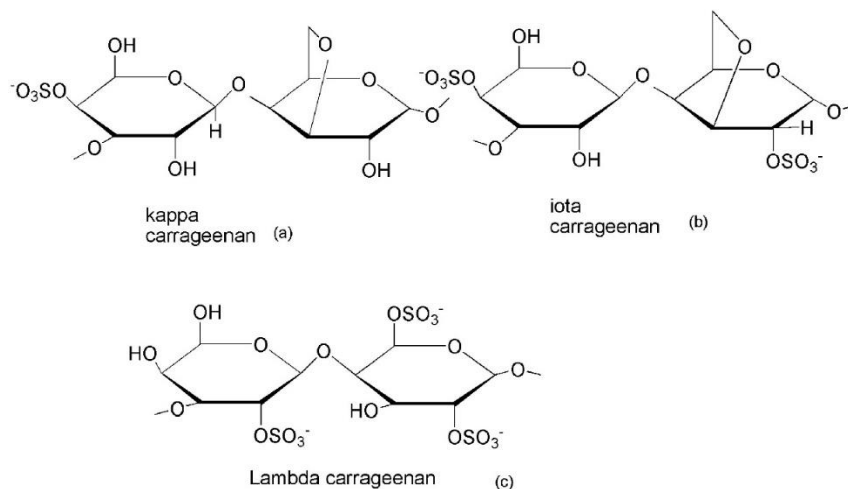


Figura 1. Diferentes tipos de estrutura química da carragena.

Fonte: Adaptado de Zia et al., 2017.

O Alg é encontrado na forma de ácido algínico em macroalgas marrons da classe Phaeophyceae, podendo constituir até 40% da biomassa dessas algas, sendo também encontrados em bactérias presentes no solo. O Alg é um polissacarídeo aniônico chamado de ficocolóide que compõem a matriz intracelular das algas. São responsáveis em manter os tecidos hidratados quando expostos, devido à sua característica hidrofílica (PAWAR E EDGAR, 2012). A estrutura das moléculas é linear sendo constituído de resíduos de ácidos α -L-gulurônicos (G) e β -D-manurônicos (M), com ligações 1-4 que são arranjados através de blocos em diferentes proporções ao longo da cadeia (Figura 2) (HECHT E SREBNIK, 2016).

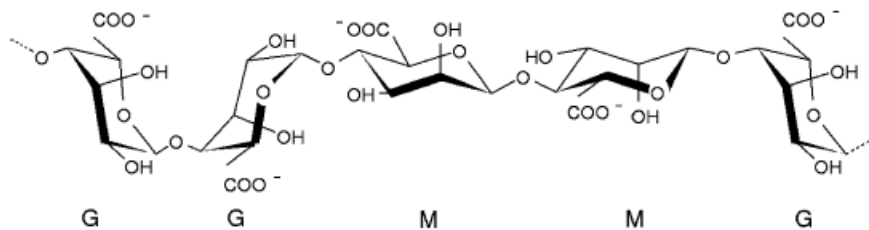


Figura 2. Estrutura de alginato. Ácidos α -L-gulurônicos (G) e β -D-manurônicos (M).
Fonte: Sikorski, 2007 – adaptado.

A obtenção de filmes destes polímeros é bem comum pela técnica *casting*, que consiste basicamente na secagem da solução filmogênica disposta sobre uma superfície (COSTA et al., 2016), onde os componentes do filme na solução aquosa se reorganizam após a secagem formando uma matriz contínua (MALI et al., 2010). Porém, tanto a Kc quanto o Alg apresentam baixa resistência mecânica e alta solubilidade em água, fazendo com que o filme libere de forma muito rápida os nutrientes e, ainda, não ofereça a contenção da muda pelo tempo necessário.

Uma das maneiras para a melhoria destas características é a síntese desses materiais juntamente com a adição de nanocelulose como reforço mecânico (SAMYN et al., 2017). A celulose, Figura 3, é um polissacarídeo constituído por unidades de D-glucopiranosose que são unidas por ligações β -1,4-glicosídeo. A conexão da cadeia de celulose é realizada através de β -D-glicose. A celulose é amplamente utilizada, pois é uma fonte vegetal abundante, renovável e biodegradável com propriedades atraentes (KHALIL et al., 2017).

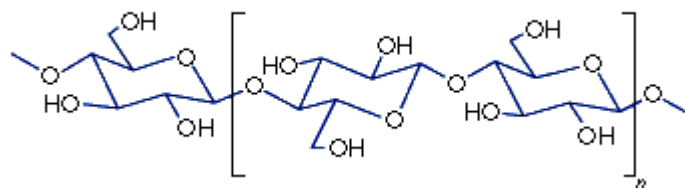


Figura 3. Estrutura química da celulose.
Fonte: Encyclopaedia Britannica, Inc., 1997 – Adaptado.

É comumente utilizado plásticos a base de derivados de petróleo na produção de recipientes como tubete. Apesar de apresentarem vantagens na produção de mudas devido ao pequeno consumo de substrato e baixo custo, não apresentam biodegradabilidade e seu descarte incorreto quando estragados causam poluição ambiental, além de ocorrer perdas de fertilizantes por lixiviação (SCHUMACHER E VIEIRA, 2016). Atualmente, no mercado existem recipientes degradáveis como o Ellepot, porém não apresentam fertilizantes em sua composição (ELLEPOT, 2021). Neste sentido, o trabalho proposto trará um recipiente biodegradável com liberação controlada de fertilizantes, tornando o cultivo de antúrio mais eficiente comparado com o cultivo convencional.

3.3 Celulose

Os recorrentes estudos sobre a celulose, o polímero mais abundante do mundo, têm mostrado muita importância, tratando-se de uma produção de 10^{14} toneladas por ano, a qual pode ser encontrada em diferentes formas como em plantas verdes, fungos, protozoários e procariontes, uma vez que é renovável e biodegradável (OWEN *et al.*, 2011; LEE *et al.*, 2022).

A celulose é um homopolímero que provém de uma cadeia rígida, formado pela repetição de uma estrutura denominada celobiose, com união das ligações de hidrogênio sendo composta por duas moléculas de glicose (SOLOMONS, 2005; BOSCHETTI 2017). As moléculas de celulose, possuem as ligações de hidrogênio constituídas por grupos hidroxilas que podem ser intramoleculares, responsáveis pela formação da fibrila, estruturas ordenadas que forma a fibra da celulose ou intermoleculares, estas responsáveis pela rigidez da molécula, fazendo com que a celulose seja um polímero estável (DAMASIO, 2015), assim como ilustrado na figura 4.

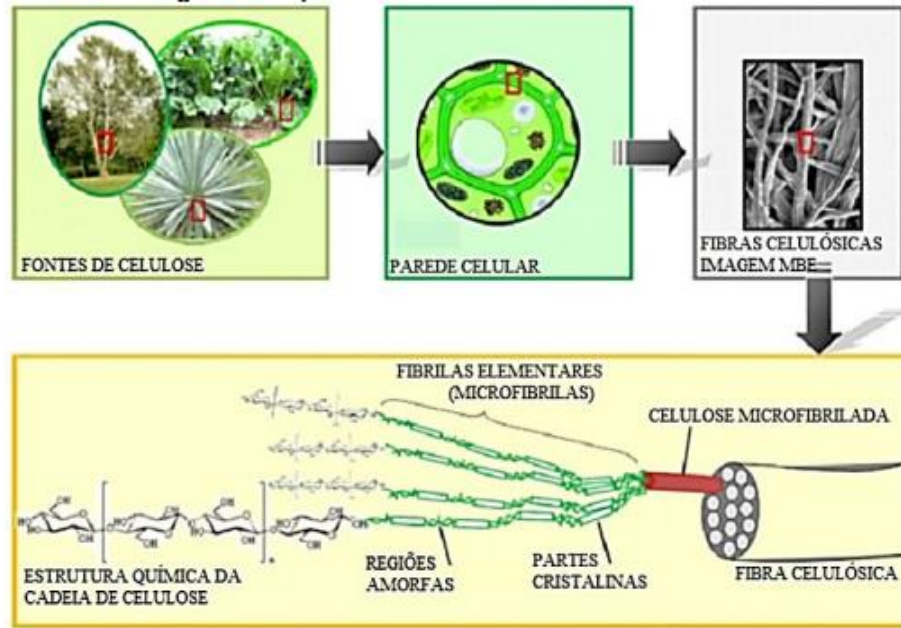


Figura 4. Esquemática da estrutura molecular da celulose.
Fonte: SANTOS, et al. (2021).

Apesar de ser um polímero natural, a celulose é capaz de substituir os polímeros sintéticos já que são biodegradáveis, além de serem aplicáveis para a produção de nanomateriais, tais como a celulose nanofibrilada e nanocristalina (TIBOLLA, 2014).

A obtenção das celuloses nanofibriladas (NFC's), se dá a partir da desintegração mecânica das fibras celulósicas, aplicando alta força de cisalhamento nas fibras, causando, dessa forma, o rompimento da parede celular e assim resultando na exposição das fibrilas e nanofibrilas com dimensões que podem variar dependendo da fonte, pré-tratamento e processo específico de desintegração (BARROS, 2020).

3.4 Agricultura e polímeros

Ao se tratar do meio ambiente, é recorrente os estudos sobre a enorme quantidade de lixo plástico que são gerados, contribuindo assim, para as alterações climáticas. Sabe-se que os plásticos, durante o seu ciclo de vida, liberam gases contribuintes para o aquecimento global, ao passo que também podem conter substâncias químicas nocivas que contaminam nossas águas, solo e atmosfera (CHAGAS, 2023).

Com isso, nos últimos anos, têm existido esforços em todos os setores, principalmente na agricultura, para estudar os biopolímeros como, termoplásticos reciclados, provenientes de fontes renováveis e/ou biodegradáveis, sendo considerados ótimos substitutos do plástico, no caso das embalagens, devido a sua capacidade de biodegradação e disponibilidade abundante na natureza (JAVAID et al., 2021; WU et al., 2022).

De acordo com Batista et al (2022), o setor da agricultura é um dos mais favorecidos do uso de materiais plásticos, estudos mostram que apenas em 2019 foi atingido 7,4 milhões de toneladas de plásticos aplicados como sacolas para cultivo, vasos, telas, embalagens para defensivos e fertilizantes, cobertura de estufa, são utilizadas nas práticas agrícolas (BATISTA et al., 2022)

Assim, muitos estudos voltados para o desenvolvimento de novos materiais a base de polímeros aplicados para vasos de mudas, agentes de liberação de agroquímicos e para a contenção de água nos solos por longos períodos também é uma alternativa consideravelmente importante (LIMA; SOUSA, 2011). Os biopolímeros são biodegradáveis e biocompatíveis além de serem provenientes de fontes renováveis e abundantes, muito aplicados como auxílio em técnicas de suplementação nutricionais para o solo, conservação de climas ideais, identificação e possíveis tratamentos de patologias que prejudicam a flora (PRADELLA, 2006; WYPIJ et al., 2023).

3.5 Ellepot®

A procura por alternativas mais vantajosas e biodegradáveis para sistemas de produção de mudas tem-se tornado algo recorrente, recipientes estes que possam oferecer mais acessibilidade, com manejo simplificado e menos impacto ambiental (FREITAS et al., 2006). Dentre esses materiais biodegradáveis, os materiais da marca Ellepot® merecem destaque, pois além de serem ótimos substitutos dos materiais plásticos, possui a facilidade de serem plantados junto com as mudas, melhorando o desenvolvimento das raízes, diminuindo as possíveis deformações e assim preservando a estrutura das mudas (LORIATO, 2023).

Os materiais Ellepot® são compostos por fibras de madeira com reforço de poliéster, também utilizados como envoltos biodegradáveis para mudas, podendo proporcionar uma produção, plantio e manejo mais eficiente (ELLEPOT, 2023). Possui benefícios atrativos como o desenvolvimento radicular mais rápido e saudável com ciclo de produção menor e alta uniformidade das plantas, além de redução dos custos de logística e eliminação de danos pelo transplantio (ELLEPOT, 2023).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em duas etapas distintas: a primeira focada na otimização do preparo, com uma avaliação específica da biodegradabilidade dos compósitos e filmes desenvolvidos. Em seguida, a segunda etapa visou validar a eficiência de liberação controlada dos fertilizantes em substratos contendo mudas de antúrios cultivadas nos materiais produzidos.

Essa divisão estratégica revelou-se crucial para aprimorar o experimento de campo, uma vez que os insights obtidos no estudo laboratorial forneceram suporte valioso para ajustar uma metodologia prática e eficaz no acompanhamento do crescimento e desenvolvimento das mudas de antúrio.

4.1 Etapa 1 – Estudos laboratoriais

4.1.1 Estrutura Experimental

Os filmes foram preparados e otimizados no Laboratório de Materiais Poliméricos e Biossorventes – LabMPB, localizado na Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

4.1.2 Material

Alginato de sódio ($C_6H_7(NaO)_6$)_n (Dinâmica, P.A), Kappa-Carragena tipo CL-153 GENUCEL® (CP Kelco Brasil S.A.), celulose nanofibrilada (CNF, dispersão aquosa de 2.8 % em massa, Suzano Papel e Celulose S.A®), Cloreto de cálcio ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) (Synth, P.A), Fertilizante a base de Nitrato de cálcio, Nitrato de potássio, MAP (fosfato monoamônico), MKP (Fosfato monopotássico), Sulfato de potássio, Sulfato de magnésio e ConMicros (solúveis em água), Glicerina ($C_3H_8O_3$) (Synth, P.A – A.C.S). Todos os reagentes serão utilizados sem prévia purificação.

4.1.3 Preparo e otimização dos filmes/compósitos

Os materiais são denominados Ferti 0,4 (concentração de fertilizantes referente a 0,4 dS m^{-1}), Ferti 0,8 (concentração de fertilizantes referente a 0,8 dS m^{-1}), Ferti 1,2 (concentração de fertilizantes referente a 1,2 dS m^{-1}) e Ferti 1,6 (concentração de fertilizantes referente a 1,6 dS m^{-1}). Para a realização dos filmes/compósitos previamente estudados foi otimizado a proporção de fertilizantes antes de aplicá-lo em campo. Primeiramente, os pós de Kc e Alg foram dispersos separadamente em água destilada a 3% em massa sob agitação magnética a 80 °C e 70 °C por 24 h, respectivamente. Em seguida, as misturas de Kc/Alg na proporção percentual de massa 40/60 foram agitadas mecanicamente (1000 rpm) por 30 min a 70 °C com base nos trabalhos de Ulrich (2022), Paçaláu (2012) e Ye (2017).

Após, adicionou-se a concentração de fertilizantes referentes à 0,4, 0,8, 1,2 e 1,6 dS m^{-1} (quantidades determinadas para os diferentes Tratamentos, de 1 a 4) à solução de Kc/Alg com 30 min de homogeneização seguindo da adição da suspensão de CNF (2,8% em massa de teor de sólido) em concentrações de 4% (m/m) deixando mais 30 min de agitação.

A seguir, foi adicionado o glicerol (30% em massa) e cloreto de cálcio (0,5% em massa), com agitação mecânica por 1 h, em sequência foram vertidas em suportes de acrilonitrila butadieno estireno (ABS) 18x16 cm (Figura 5), com ranhuras para desenvolvimento das raízes, obtidos através de impressão 3D e secas em estufa a 37 °C por 16 h. Foram realizadas três repetições deste procedimento para cada unidade amostral representada acima.



Figura 5. Molde do compósito.

Fonte: Acervo pessoal.

Como forma de redução de custos, tempo de preparo e análise, realizou-se um planejamento fatorial nas análises com CNF, assim como a influência da espessura dos filmes nas propriedades mecânicas e físicas.

4.1.4 Modelagem para uso dos filmes como recipiente para propagação vegetal

O material obtido (Figura 6), foi modelado semelhante às dimensões dos recipientes degradáveis Ellepot para mudas em estágio inicial de propagação vegetal, com 90 mm de comprimento, 35 mm de altura, sendo utilizado um molde de aço com diâmetro equivalente a 24 mm, finalizando a modelagem dos filmes com uma cola vegetal (RICLA – colas e resinas).



Figura 6. Compósito comparado ao Ellepot

Fonte: Acervo pessoal.

A partir da montagem do cilindro é possível realizar o cálculo de volume (1), dando sequência à fórmula de densidade (2), determinando a massa aproximada de substrato presente no compósito.

$$V = \pi \times R^2 \times H \quad (1)$$

em que:

V – Volume;

R – Raio da circunferência;

H – Altura do recipiente.

$$D = M \div V \quad (2)$$

em que:

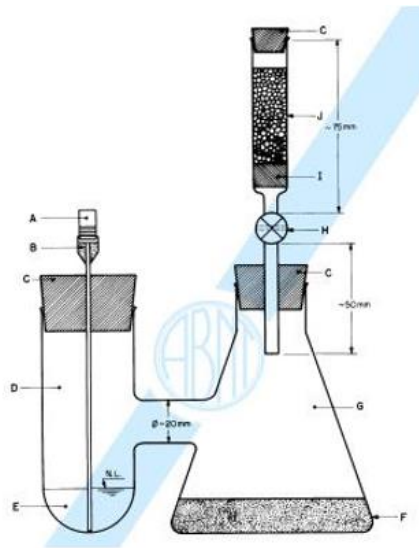
D – Densidade do substrato;

M – Massa do substrato.

Com o volume conhecido do cilindro de 15,83 cm³, e com as características do substrato Sphagnotec 08 (Turfa de Sphagno) de densidade conhecida 93,6 kg m⁻³ é possível descobrir o valor aproximado da massa de substrato 1,48 g, presente em cada envolto, a partir das equações.

4.1.5 Biodegradabilidade dos compósitos/filmes

A análise de biodegradação foi baseada na metodologia da norma NBR 14283 – Determinação da biodegradação pelo método respirométrico de Bartha. O teste foi realizado utilizando o recipiente de Bartha (vidraria específica para este ensaio, observada na Figura 7). Os recipientes contendo substrato/material foram colocados em incubadora refrigerada (BOD - Tecnal TE-371) a 28 °C. O teste desenvolveu-se em triplicata durante o período de avaliação da liberação. O CO₂ produzido por biodegradação fora calculado por titulação volumétrica ácido-base padrão. A medição de CO₂ inicialmente era diária, diminuindo a sua frequência conforme a redução do processo de biodegradação.



*A - Tampa da cânula; B - Cânula (\varnothing entre 1 mm e 2 mm), com canhão Luer; C - Rolha de borracha; D - Braço lateral (\varnothing ~ 40 mm; H ~ 100 mm); E - Solução de KOH; F - Solo; G - Frasco de Erlenmeyer (250 mL); H - Válvula; I - Suporte (lã de vidro ou algodão); J - Filtro de ascarita (\varnothing ~ 15 mm; H ~ 40 mm)

Figura 7. Vista em corte de um Respirômetro.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1999.

Visando a determinação do índice de biodegração da matéria orgânica através da quantidade de gás carbônico (CO_2) produzida pelos microrganismos, em condições padronizadas. O substrato utilizado trata-se da turfa de sphagnum (Sphagnotec 08) com as seguintes características Capacidade de retenção de água=440,8% peso/peso, $\text{pH}=4,4$, densidade $93,6 \text{ kg m}^{-3}$ e $\text{CE} = 0,1 \text{ mS.cm}^{-1}$. Foi realizado a secagem a temperatura ambiente por 24h, após foram pesados 10 g, adicionados aos respirômetros e aplicando 0,5 mL de água para atingir a capacidade de campo. Foram misturados 0,2 g de polímeros denominados Ferti 0,4, Ferti 1,6, S/Ferti (Polímero sem adição de fertilizantes) e controle (solo sem amostra).

Também foi realizado uma análise de biodegração de envoltos semelhantes em solo. Sendo o solo utilizado classificado como neossolo quartzarênico de textura arenosa (obtido na cidade de Leme, SP). O solo foi seco em estufa a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h e peneirado em malha 2,0 mm, após foram pesados 50 g e adicionados aos respirômetros. A capacidade de campo foi determinada a 60%, no qual foi aplicado 7,7 mL de água para cada respirômetro.

A análise de biodegração foi realizada durante 90 dias, com três repetições para cada amostra, totalizando 21 respirômetros de bartha, os quais foram acondicionados a 29°C em BDO durante a análise. A partir das titulações das amostras foi possível traçar um perfil de biodegração dos compostos no substrato, e no solo, considerando que os resíduos com eficiência de biodegração maiores que 30% são passíveis de serem biodegradados.

4.1.6 Avaliação das características físicas dos compósitos/filmes

4.1.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise foi realizada na Universidade Federal de São Carlos - UFSCar campus Araras, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM) Thermo Scientific Prisma E, em tensão de 10 Kv para superfície e na magnificação de 500 vezes. As amostras do envolto após o período de biodegradação foram metalizadas com ouro e padronizadas com comprimento e largura de 1 x 1 cm, sendo coladas ao stub com fita dupla face de carbono, em busca da identificação de estruturas e microrganismos.

4.1.6.2 Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As análises de FTIR foram realizadas na Universidade Federal de São Carlos – UFSCar campus Araras utilizando um FT-IR Tensor II (Bruker®) com o acessório ATR (“attenuated total reflectance”) e com acessório suporte para pastilha de KBr (Brometo de potássio). Os espectros foram obtidos pela média de 32 varreduras, com acúmulo de 128 varreduras e com resolução de 4 cm⁻¹. A região do espectro eletromagnético das varreduras foram entre 4000 a 550 cm⁻¹.

4.1.6.3 Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC)

As análises de DSC foram realizadas na Universidade Federal de São Carlos – UFSCar campus Araras em um DSC 6000 (Perkin Elmer) de acordo com os programas de temperatura: (I) aquecimento de 25 °C a 150 °C; (II) resfriamento até -70 °C e; (III) aquecimento de -70 °C a 350 °C. Nas seguintes condições de análise: taxa de aquecimento a 10 °C min⁻¹, fluxo de N₂ a 20 ml min⁻¹ com panela de alumínio fechada e aproximadamente 14 mg de amostra. A segunda varredura de aquecimento foi usada para obter os valores de transição.

4.1.6.4 Análise Termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica do material foi determinada pelo aquecimento destas de 25°C a 900°C com uma taxa de aquecimento de 10°C min⁻¹, fluxo de N₂ de 20 cm³ min⁻¹ e pressão de gás de 3 bar. As análises foram realizadas na Universidade Federal de São Carlos – UFSCar campus Araras utilizando um equipamento TGA 4000 – Perkin Elmer.

4.1.7 Biodegradação do Ellepot

A análise de biodegradação foi baseada na metodologia da norma NBR 14283 – Determinação da biodegradação pelo método respirométrico de Bartha. Os recipientes contendo substrato/material foram colocados em incubadora refrigerada (BOD - Tecnal TE-371) a 28 °C. O teste desenvolveu-se em triplicata durante o período de 90 dias com a avaliação da liberação, submetendo o Ellepot às condições padronizadas com substrato (Turfa de Sphagno) e solo (neossolo quartzarênico de textura arenosa), realizado nos laboratórios da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar campus Araras.

Para o substrato foi realizado a secagem a temperatura ambiente por 24h, após foram pesados 10 g, adicionados aos respirômetros e aplicando 0,5 mL de água para atingir a capacidade de campo. Enquanto o solo foi seco em estufa a 40 °C por 24 h e peneirado em malha 2,0 mm, após foram pesados 50 g e adicionados aos respirômetros. A capacidade de campo foi determinada a 60%, no qual foi aplicado 7,7 mL de água para cada respirômetro.

A análise de biodegradação foi realizada durante 90 dias, com três repetições para cada amostra, totalizando 12 respirômetros de bartha (figura 8), os quais foram acondicionados a 29° C em BDO durante a análise. A partir das titulações das amostras foi possível traçar um perfil de biodegradação dos recipientes no substrato, e no solo.



Figura 8. Vista horizontal dos respirômetros com Ellepot.

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.8 Análise de liberação em água

A análise de liberação em água foi determinada através da adição de uma fração dos filmes com concentração estabelecida (S/Ferti, 0,4, 1,6, 3,2 dS.m⁻¹ e Ellepot) de 0,5 g de material para 50 mL de água ultrapura do tipo I, sendo avaliado por um período de 12 minutos. A condutividade elétrica foi determinada por um condutivímetro de bancada (Simpla EC150) localizado na Universidade Federal de São Carlos – UFSCar campus Araras.

4.2 Etapa 2 – Estudos de Campo

4.2.1 Delineamento experimental

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 63 unidades amostrais para cada tratamento, sendo Tratamento 1 - recipientes biodegradáveis com Condutividade Elétrica (CE) de $0,4 \text{ dS m}^{-1}$; Tratamento 2 - recipientes biodegradáveis com CE de $0,8 \text{ dS m}^{-1}$; Tratamento 3 - recipientes biodegradáveis com CE de $1,2 \text{ dS m}^{-1}$; Tratamento 4 - recipientes biodegradáveis com CE de $1,6 \text{ dS m}^{-1}$, todos obtidos na ETAPA 1 e Tratamento 5 - recipiente degradável sem nutrientes (Ellepot), totalizando 315 unidades amostrais.

As diferentes condutividades elétricas foram baseadas na combinação de Nitrato de cálcio, Nitrato de potássio, MAP (fosfato monoamônico), MKP (Fosfato monopotássico), Sulfato de potássio, Sulfato de magnésio e ConMicros, os quais foram adicionados aos recipientes biodegradáveis na ETAPA 1. A recomendação básica foi adaptada de Tombolato et al. (2004), e as diferentes concentrações se justificam pela busca da liberação controlada de fertilizantes durante 3 meses de ensaios.

Para a finalidade de avaliação da resistência, tempo de durabilidade em estufa agrícola e desenvolvimento das plantas de antúrios, foram realizadas avaliações mensais utilizando 21 unidades amostrais durante 90 dias para cada tratamento, as quais permaneceram em sistema de irrigação diária. Os múltiplos amostrais de 7 foram necessários devido a uma consulta prévia realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo da UFSCar, sendo sugerido 7 unidades amostrais para compor uma amostra para a análise química do substrato e do tecido vegetal. Desta forma, cada avaliação mensal conta com 3 repetições de 7 unidades amostrais.

4.2.2 Análise dos materiais em campo

O monitoramento da liberação de nutrientes foi feito através da análise química mensal do substrato para os diferentes tratamentos durante 90 dias. A adição de fertilizantes ao substrato altera fatores da solução solo como pH, capacidade de troca de cátions (CTC) e condutividade elétrica devido aos sais presentes no composto. Por meio desses fatores há possibilidades da identificação da liberação de nutrientes pelo material polimérico através da técnica escolhida (AFÁZ et al., 2017). Também, a parte aérea das plantas de antúrios foi analisada com propósito de determinar a quantidade dos nutrientes no tecido vegetal, a fim de obter informações da liberação de fertilizante no substrato utilizando a planta como extratora de solução (SILVA et al., 2012). As análises para determinação de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) foram feitas no Laboratório de Fertilidade do Solo da UFSCar/Araras.

Em intervalos de 30 dias (30, 60 e 90 dias), o crescimento e o desenvolvimento das plantas foram avaliados em função dos diferentes tratamentos aplicados através das medidas de altura de planta, diâmetro da folha maior e número de folhas na planta (Figura 9). As medidas de altura de planta e diâmetro da folha maior foram feitas com o auxílio de um paquímetro; o número de folhas foi determinado com contagem manual; para a massa fresca foi utilizada uma balança de precisão e a massa seca foi mensurada após a secagem em estufa de circulação de ar à 65 °C até atingir massa constante. Além disso, a massa fresca e seca das plantas foram mensuradas (AIRES et al., 2011). Uma média composta por 7 unidades amostrais foi considerada uma repetição experimental para cada parâmetro analisado.

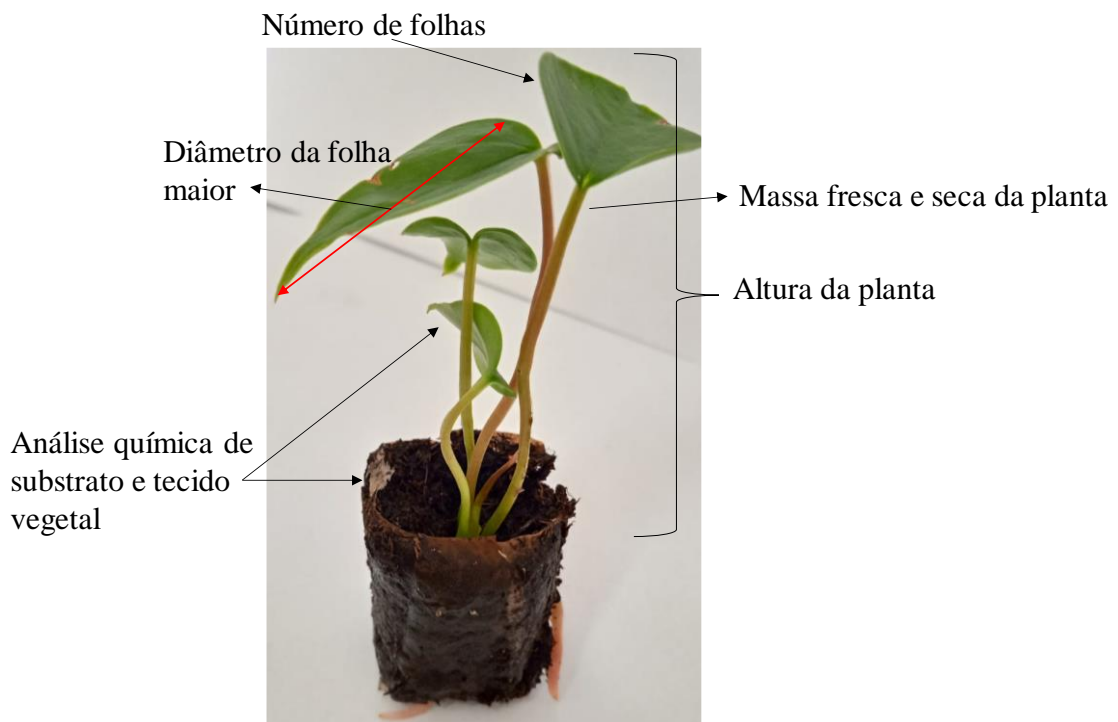


Figura 9. Parâmetros analisados em intervalos de 30 dias (30, 60 e 90 dias) para os diferentes tratamentos em plantas de antúrios.

Fonte: Acervo pessoal.

4.2.3 Análise Estatística dos dados

Os resultados foram analisados estatisticamente através do R CORE TEAM software, pelo qual os dados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA) a fim de verificar quais tratamentos apresentaram diferença significativa.

Posteriormente para realizar comparações pareadas das médias dos tratamentos foi aplicado o teste de Tukey a 5 % de probabilidade ($p \leq 0,05$).

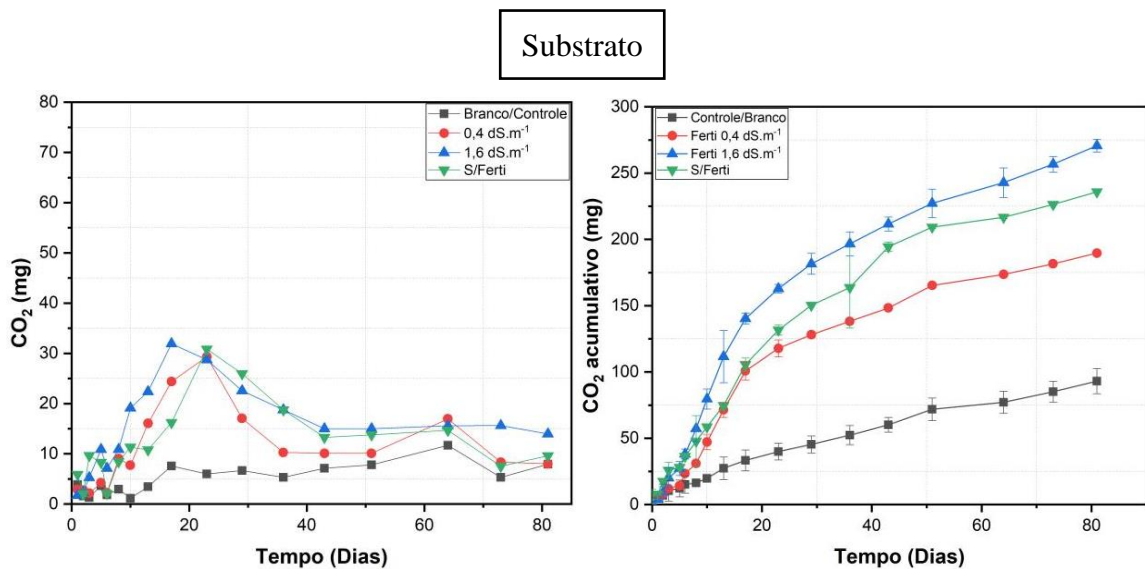
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Etapa 1

Nesta etapa busca-se analisar os efeitos da incorporação dos polímeros naturais com as diferentes concentrações de fertilizantes 0,4, 0,8, 1,2, e 1,6 dS m⁻¹ nos compósitos obtidos, de forma a entender sua influência nas propriedades mecânicas, térmicas e de biodegradabilidade.

5.1.1 Biodegradação dos compósitos/filmes

A terminologia padrão de rotulagem ASTM D-5488-94d define o termo “biodegradação” para os materiais “capazes de sofrer decomposição em dióxido de carbono, metano, água, compostos inorgânicos ou biomassa microbiana em que o mecanismo predominante é ação enzimática de microrganismos, que podem ser medidos por testes de padronização, em um período de tempo especificado, refletindo as condições de descarte disponíveis” (MAJEED, et al., 2015). O perfil de biodegradação dos materiais é apresentado na Figura 10, através da liberação de CO₂, coincidente ao potencial de biodegradabilidade do sistema. A análise em substrato aponta uma grande taxa de biodegradação nos primeiros 30 dias, demonstrando um decaimento após esse período, já em solo é possível notar uma grande taxa nos 10 dias iniciais.



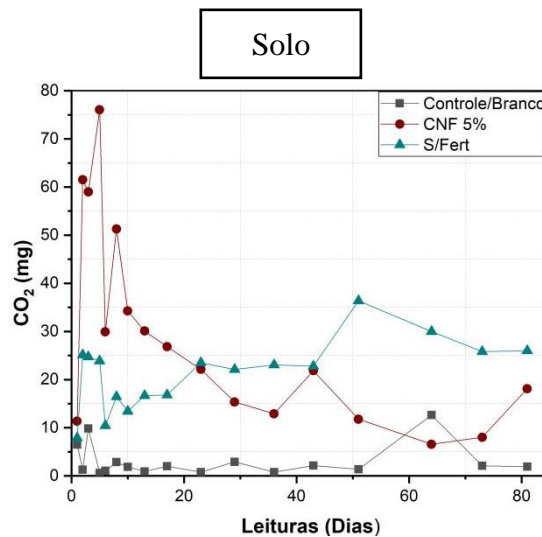


Figura 10. Biodegradação diária no substrato com gráfico acumulativo e biodegradação no solo.
Fonte: Acervo pessoal.

A partir dos resultados obtidos é possível comparar a alta taxa de liberação em substrato do compósito Ferti 1,6 dS m⁻¹ com um pico de liberação de 32 mg de CO₂ após 17 dias do início da biodegradação, demonstrando-se como a amostra com maiores taxas da biodegradação durante o experimento, já a liberação do compósito Ferti 0,4 dS m⁻¹ apresentou o seu pico de liberação com 29 mg de CO₂ após 23 dias do início da biodegradação, estando abaixo em quase todos os pontos. Além disso foi realizado o branco/controle contendo apenas o substrato dentro do respirômetro e também o compósito com apenas polímeros sem fertilizante S/Ferti, que apresentaram menores taxas de biodegradação quando comparados à Ferti 1,6 dS m⁻¹.

Em relação ao experimento realizado em solo é possível notar maiores taxas de liberação de CO₂, com um pico de liberação no compósito CNF 5% de 76 mg de CO₂ no quinto dia de análise, os fatores dessa elevada taxa de biodegradação estão atrelados à capacidade de campo do solo e as características do mesmo, demonstrando que em solo o comportamento dos envoltos são diferentes aos do substrato.

Segundo ANGELO et al. (2021), a taxa de liberação de CO₂ está diretamente ligada à interação dos microrganismos com o meio, onde a maior taxa de liberação CO₂ significa maior biodegradabilidade do material, portanto a presença da água e à liberação dos fertilizantes no substrato, permitem o crescimento dos microrganismos pela disponibilidade de nutrientes e condições favoráveis para seu desenvolvimento.

Os polímeros biodegradáveis naturais como a lignina, carragena, alginato, celulose e outros polissacarídeos, não podem ser utilizados na forma natural pura como material de revestimento eficaz, devido suas propriedades inerentes que agregam algumas limitações em seu uso, como a capacidade hidrofílica e alta demanda industrial (MAJEED, et al., 2015). Portanto são necessárias modificações químicas e físicas dos polímeros para melhorar sua

relatividade e biocompatibilidade com outras classes de compostos naturais ou sintéticos, podendo ser analisado aos compósitos desenvolvidos.

Além disso fatores como a desintegração do revestimento do compósito (Figura 11), tornam-se necessários para a liberação do fertilizante, envolvendo diversos fatores bióticos e abióticos (como a retenção de água), essa quebra das ligações facilita a entrada de microrganismos e a saída dos fertilizantes disponibilizadas no substrato (MAJEED, et al., 2015).

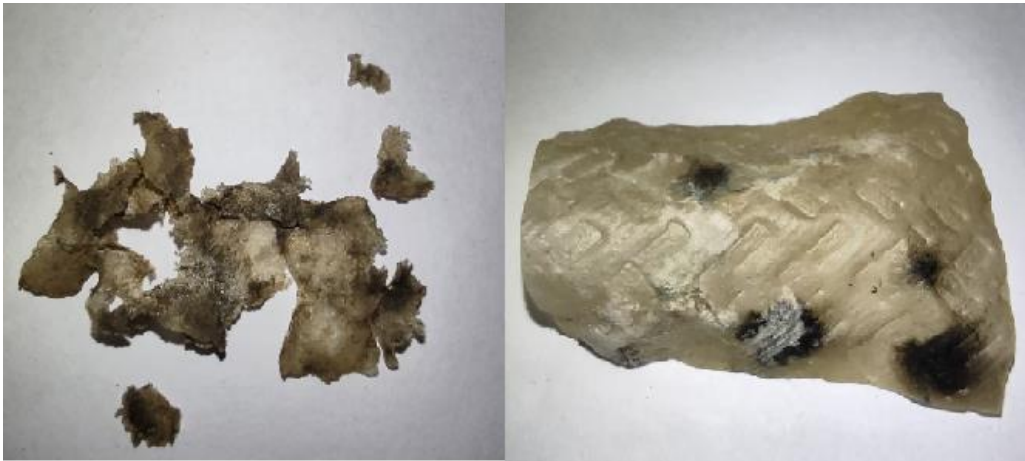


Figura 11. Compósito após a biodegradação.

Fonte: Acervo pessoal.

A desintegração foi observada ao final do experimento, onde os compósitos biodegradados em solo apresentaram maior desintegração das cadeias poliméricas (influência do solo e maior presença de água 7,7 ml) em relação ao substrato (compósito à direita), além do intumescimento inicial pela absorção da água presente, aumentando a presença de microrganismos nas amostras. Portanto nota-se que a disponibilidade de água afeta diretamente na biodegradação, como no experimento foi utilizado apenas 0,5 ml de água para o substrato o compósito não sofreu uma drástica desintegração, apresentando menores taxas de CO_2 , em relação ao gráfico da análise com solo.

5.1.2 Avaliação das características físicas dos compósitos/filmes

5.1.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Arelado às análises de biodegradação é possível relacionar a morfologia do envolto pelas imagens disponibilizadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (SEM), onde a maior concentração do fertilizante $1,6 \text{ dS m}^{-1}$ apresentou maior presença de fungos e maior degradação das estruturas do envolto, observadas na Figura 12.

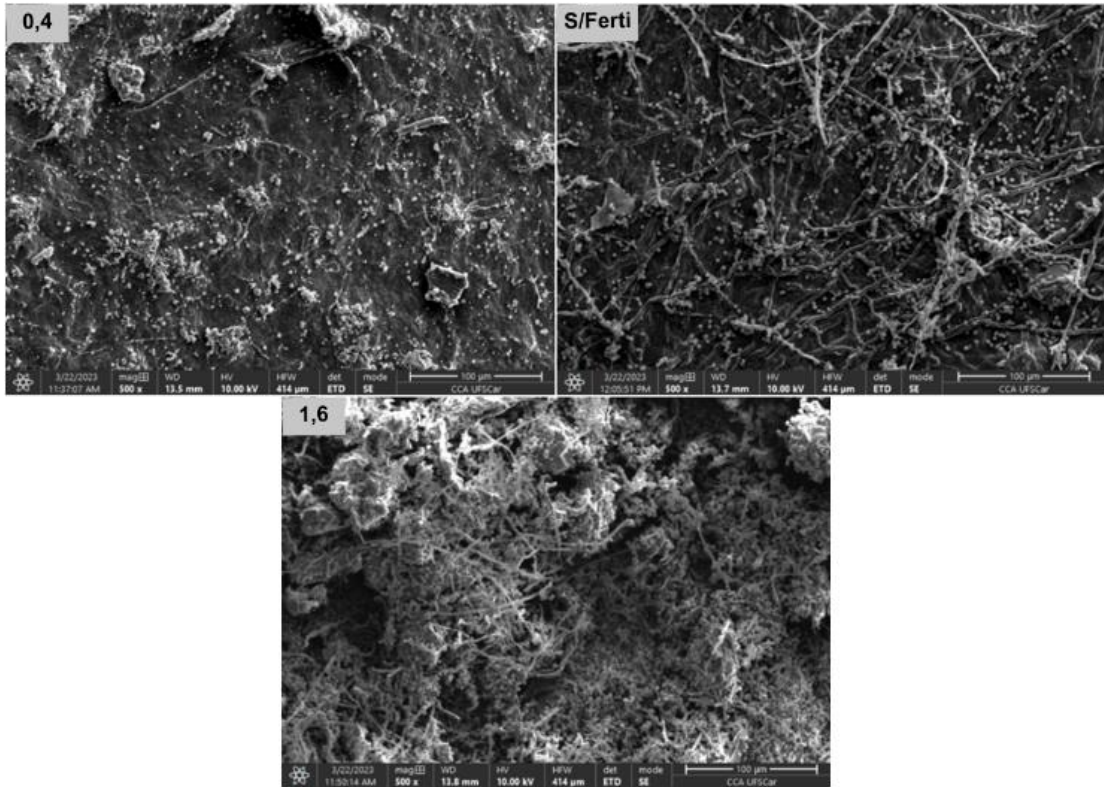


Figura 12. Imagens MEV dos compósitos após biodegradação.
Fonte: Acervo pessoal.

Como resultados obtidos é possível caracterizar os compósitos como biodegradáveis, pela capacidade de sofrer degradação pela ação de microrganismos, portanto a presença de fertilizantes e umidade criaram condições favoráveis para o desenvolvimento de microrganismos no compósito, sendo assim a quantidade de nutrientes entregue será absorvida pela planta e a matriz irá se degradar sem deixar resíduos no substrato.

5.1.2.2 Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

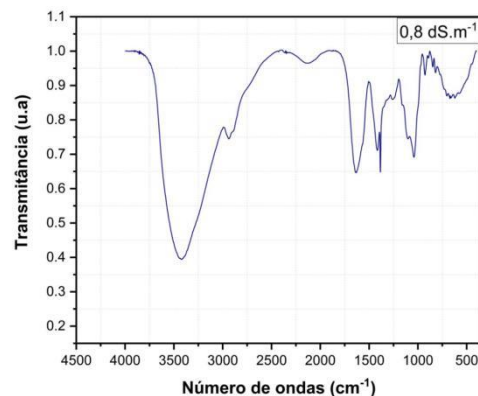
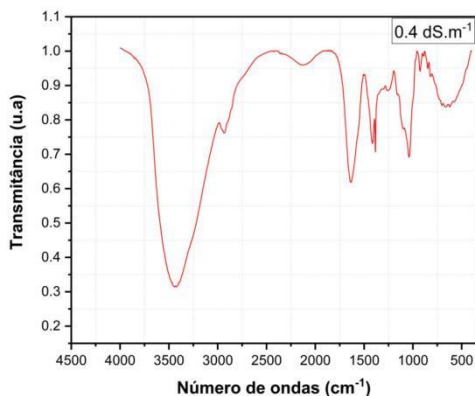
Segundo EZATI et al. (2021), a técnica de FTIR permite compreender as interações, miscibilidade e as mudanças químicas entre os componentes presentes no material. Na Figura 13 é possível observar os espectros infravermelhos dos compósitos desenvolvidos.

O alginato possui bandas específicas em 1600 cm^{-1} e 1400 cm^{-1} contemplado pelas vibrações de estiramento assimétrico e simétrico de $-\text{COO}-$. A banda em 946 cm^{-1} destaca a vibração de estiramento C-O dos resíduos de ácidos urônicos, a banda 878 cm^{-1} é atribuída à vibração de deformação C1-H dos resíduos de ácidos β -manurônicos e a banda em $817,1\text{ cm}^{-1}$ é atribuída aos resíduos de ácidos manurônicos (GÓMEZ-ORDÓÑEZ; RUPÉREZ, 2011).

A carragena possui bandas características entre 1260-1210 cm^{-1} atribuídas ao estiramento de grupos éster sulfato (O-S-O), bandas entre 933-928 e 1070 cm^{-1} referem-se ao 3,6-anidro-Dgalactose (DA) e bandas entre 850-840 cm^{-1} são D -galactose-4-sulfato (G4S) (PAŞCALĂU, 2012). A partir de pesquisas desenvolvidas há a melhor interação entre os componentes que fazem parte do filme polimérico na proporção de 40/60 de K-C/ALG devido ao deslocamento e desaparecimento das bandas características e a não sobreposição das bandas com relação aos polímeros puros (ULRICH; FAEZ, 2022)

Podemos destacar bandas características em 3260 cm^{-1} representando às vibrações de alongamento dos grupos O-H da água sobreposto ao estiramento assimétrico de N-H (KHAN et al., 2021). Foi observado em 1650 cm^{-1} uma banda atribuída ao alongamento de C=O do grupo -COOH e em 1400 cm^{-1} uma banda condizente aos modos de dobras característicos dos grupos N-H. Bandas em 1100 cm^{-1} e 900 cm^{-1} também são observadas e atribuídas ao alongamento de P-O-H e PO_4 (KHAN et al., 2021; JEGATHEESAN et al., 2012).

Para celulose nanofibrilada as bandas estão em 3420 cm^{-1} e 2915 cm^{-1} atribuídas às vibrações de estiramento dos grupos O-H e C-H, respectivamente (CHIROMITO et al., 2019). É também observado bandas em 1429 cm^{-1} atribuídas às vibrações simétricas de -CH₂ e bandas em 1370 cm^{-1} referentes às vibrações no anel de piranose de CH. Além das bandas descritas para CNF, há também uma banda em 900 cm^{-1} representando vibrações de estiramento dos grupos C-O-C em ligações glicosídicas (SAMARASEKARA et al., 2018).



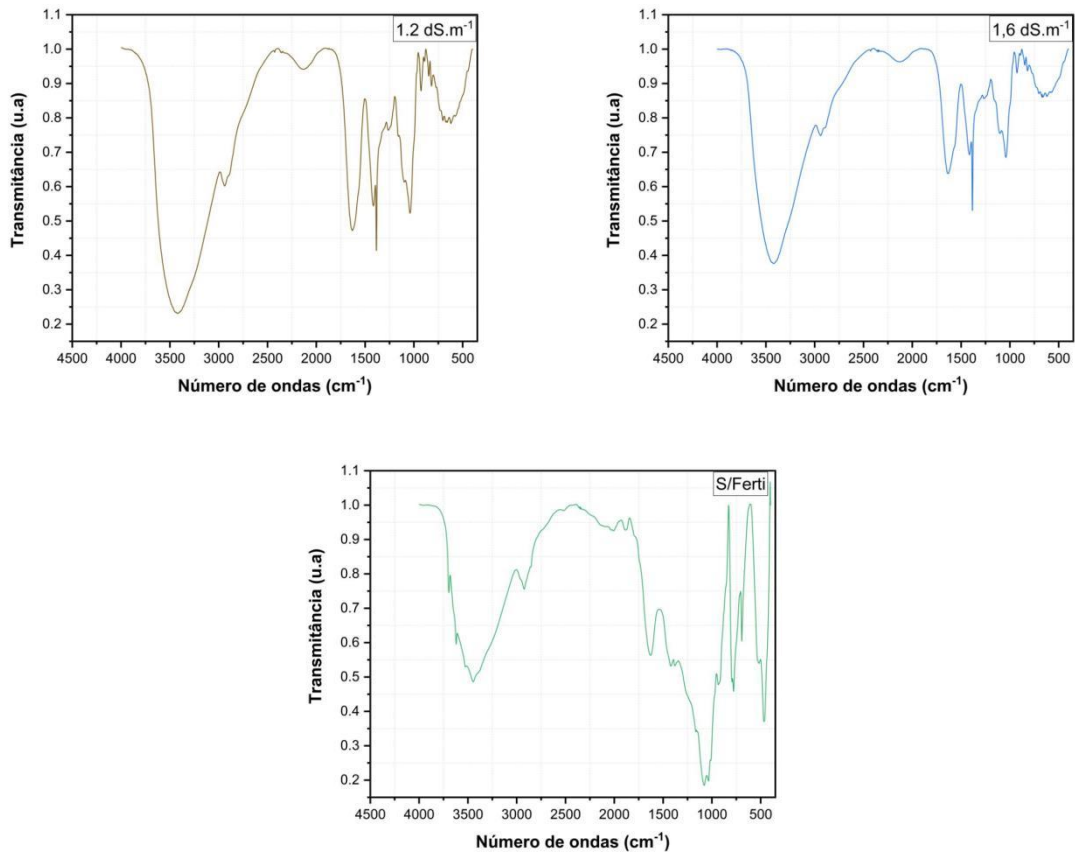


Figura 13. Gráficos de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier.
Fonte: Acervo pessoal.

A partir das bandas de absorção no infravermelho observadas é possível notar a semelhança no comportamento dos materiais desenvolvidos (Ferti 0,4, Ferti 0,8, Ferti 1,2, Ferti 1,6 e S/Ferti), notando bandas características dos polímeros naturais, sendo que a variação da intensidade pode estar relacionada à interação dos polímeros com os fertilizantes observadas nas bandas de 1150 a 880 cm^{-1} .

5.1.2.3 Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC)

A análise de Calorimetria Diferencial de Varredura trata-se de um grupo de técnicas utilizadas para submeter uma substância/material a propriedades físicas (temperatura e atmosfera específica), para caracterizar as temperaturas de fusão, cristalização, transição vítrea, entre outros aspectos (COSTA, 2016). A partir disso é possível caracterizar os eventos que ocorrem na análise como transições de primeira e segunda ordem, sendo as de primeira ordem definidas como variações de entalpia (endotérmicas ou exotérmicas) que dão origem aos picos e as de segunda ordem caracterizam-se pela variação da capacidade calorífica (sem variação de entalpia) (CANEVAROLO, 2003).

A partir da Figura 14 é possível entender o comportamento dos materiais, caracterizando a estrutura dos compósitos desenvolvidos. As curvas indicadas demonstram semelhança apresentando um comportamento exotérmico, no qual é possível relacionar os primeiros picos na variação de temperatura de 216 a 219 °C, com a degradação dos polímeros naturais, indicando reações de despolimerização e descarboxilação parcial dos grupos carboxílicos para o alginato e descarbonização da ligação glicosídica para a carragena (ULRICH; FAEZ, 2022).

As amostras apresentam proximidade no pico inicial, com curvas mais acentuadas à medida que há o incremento de fertilizantes, também é notável que há um segundo pico exotérmico entre 293 a 298 °C indicados nos materiais com fertilizante que é mais expressivo com a maior concentração 1,6 dS.m⁻¹, essa etapa pode indicar a degradação oxidativa dos micro e macro nutrientes presentes nos envoltos que estabilizam juntos com a celulose nanofribilada com a degradação final em 350 °C.

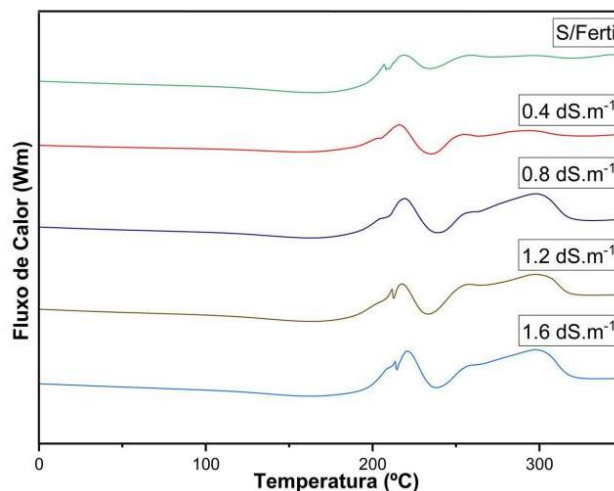


Figura 14. Gráfico de calorimetria de varredura diferencial.

Fonte: Acervo pessoal.

5.1.2.4 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise de termogravimetria tem como objetivo entender o comportamento do material quando submetido a alta temperatura, avaliando a estabilidade térmica, bem como a composição e interação dos componentes dos compósitos a partir da termodegradação, essa técnica apresenta a perda ou ganho de massa em função da temperatura. Na Figura 15 é possível observar o comportamento dos materiais desenvolvidos, visto que os materiais com a presença de fertilizantes possuem uma curva de termodegradação semelhante, diferente do compósito sem a presença de fertilizantes.

Nos materiais com a presença de fertilizantes são observadas etapas de degradação onde a temperatura inicial (T_i) é aquela em que ocorre o início da variação de massa e a temperatura

final (T_f) é aquela que indica que o processo da variação foi concluído. É possível identificar três etapas, a primeira ocorre com $T_i = 56\text{ °C}$ e $T_f = 216\text{ °C}$, equivalente a perda de 12 % de massa; a segunda ocorre com $T_i = 217\text{ °C}$ e $T_f = 650\text{ °C}$, equivalente a perda de 54 % de massa; e a terceira etapa ocorre com $T_i = 652\text{ °C}$ e $T_f = 797\text{ °C}$, equivalente a perda de 12 % de massa.

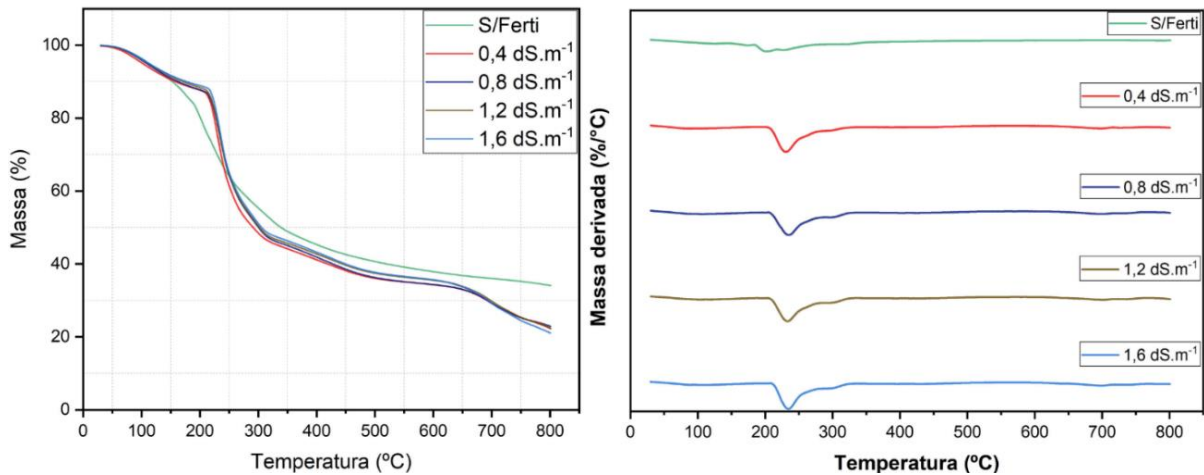


Figura 15. Gráfico de termogravimetria dos compósitos e gráfico derivativo.

Fonte: Acervo pessoal.

O gráfico da derivação da massa em porcentagem pela temperatura permite analisar os estágios, onde no primeiro deles entre 30 a 200 °C representa a evaporação da água, o segundo de 201 a 315 °C traz a degradação dos materiais e o terceiro estágio de 316 a 800 °C representa a total degradação dos compósitos com resíduo de 21,4 %. Por fim o gráfico apresenta uma temperatura máxima de degradação com 233 °C (PETRUZ, 2023).

5.1.3 Biodegradação do Ellepot

Essa análise apresenta os tratamentos BRSB (Branco Substrato), SUB (Substrato), BRSL (Branco Solo) e SOL (Solo), foram submetidos à biodegradação pelo método respirométrico de Bartha, permitindo a plotagem do gráfico de liberação de CO_2 (Figura 16). Diferente dos compósitos desenvolvidos o gráfico do Ellepot apresenta picos muitos semelhantes mesmo nos diferentes meios (substrato e solo), caminhando horizontalmente no gráfico, sendo possível observar que os maiores picos de liberação não ultrapassam 30 mg de CO_2 , além disso a liberação se torna constante mesmo após os primeiros 20 dias, nos envoltos com polímeros aditados de fertilizantes há maiores picos de liberação o que acelera e favorece a entrada de microrganismos.

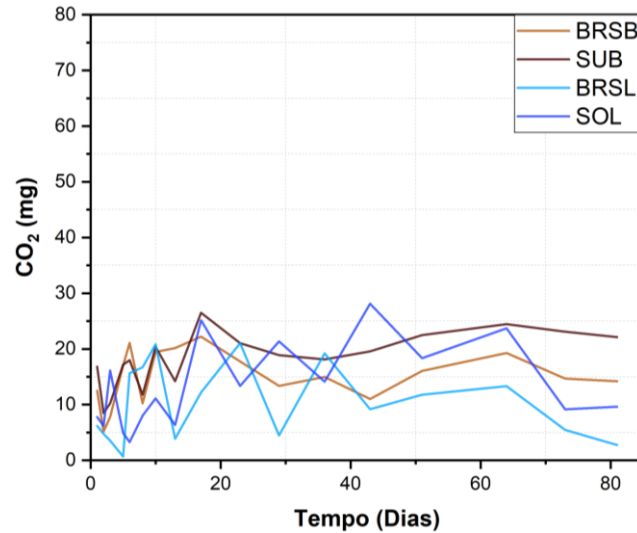


Figura 16. Biodegradação do Ellepot em substrato e solo.

Fonte: Acervo pessoal.

Segundo Angelo et al. (2021), a taxa de liberação de CO_2 está diretamente ligada à interação dos microrganismos com o meio, onde a maior taxa de liberação CO_2 significa maior biodegradabilidade do material, portanto a presença da água, permite o crescimento dos microrganismos pela disponibilidade de condições favoráveis para seu desenvolvimento.

5.1.4 Análise de liberação em água

Após a imersão em água os compósitos começam a intumescer, liberar fertilizantes e desintegrar-se de forma a aumentar a condutividade elétrica, permitindo traçar uma curva de liberação demonstrada na figura 17. Para esta análise fora desenvolvido um envolto agregado com o dobro da concentração de fertilizantes para avaliar a diferença de liberação dentre eles, o Ellepot também passou por análise, porém não apresentou CE durante o tempo estabelecido, isso se deve por sua formulação com apenas celulose, sem outros polímeros ou fertilizantes. É possível notar que os compósitos apresentaram variação em sequência em decorrer da concentração onde, o sem fertilizante (S/Ferti) manteve-se mais baixo com a máxima de $2,2 \text{ dS.m}^{-1}$, já o 0,4 e 1,6 mantiveram-se semelhantes durante todo período com uma máxima de $2,5 \text{ dS.m}^{-1}$ e o envolto com dobro de fertilizantes 3,2 demonstrou a influência de fertilizantes mais elevada com a máxima liberação de $2,7 \text{ dS.m}^{-1}$.

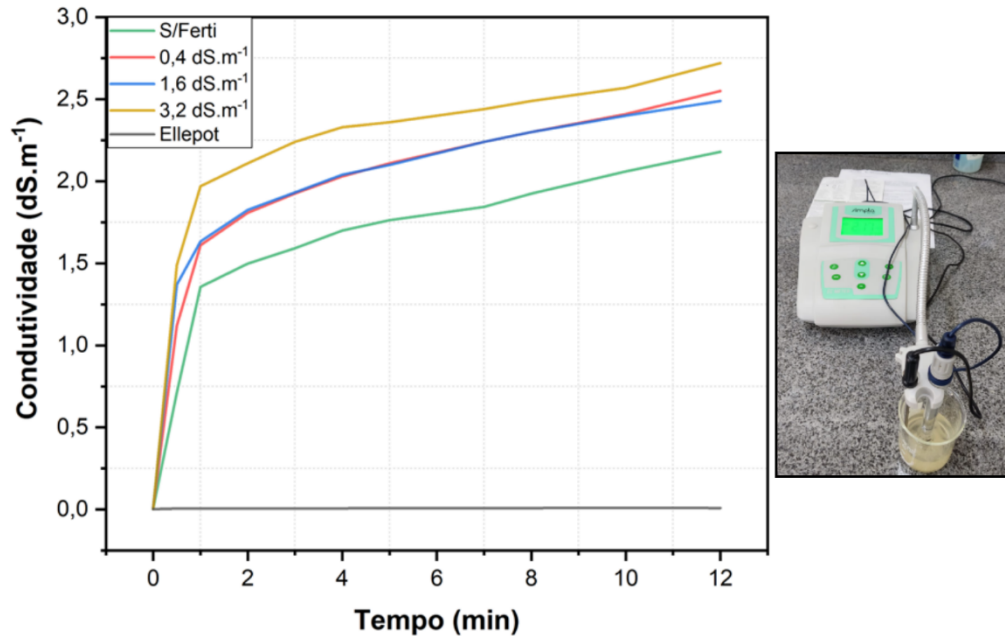


Figura 17. Condutividade em água ultrapura e visualização do experimento.
Fonte: Acervo pessoal.

Segundo Ângelo et al. (2021), uma hora em água seria o equivalente a 20 dias no solo, em um estudo com materiais poliméricos semelhantes, os compósitos desenvolvidos com leve agitação apresentaram uma desintegração total por volta dos 12 minutos, portanto teoricamente a desintegração ocorreria em menos de 7 dias. Além disso é possível notar a influência direta dos fertilizantes com polímeros, no qual os tratamentos desenvolvidos apresentaram uma condutividade mais elevada do que a concentração própria de fertilizantes adicionados, isso se dá por conta de que os polímeros já apresentam uma condutividade própria, comprovada pelo compósito S/Ferti.

5.2 Etapa 2

5.2.1 Análise biométrica dos antúrios em campo

A análise biométrica realizada permitiu a visualização da degradação do material quando aplicado ao campo em conjunto às plantas, durante as coletas nos períodos de 30, 60 e 90 dias. Demonstrando o comportamento do material em campo e avaliando-se as características sensoriais (visuais) confirmando como a influência da água atua na degradação dos envoltos, sendo observadas na Figura 18, demonstrando que em 90 dias não era possível observar o compósito.

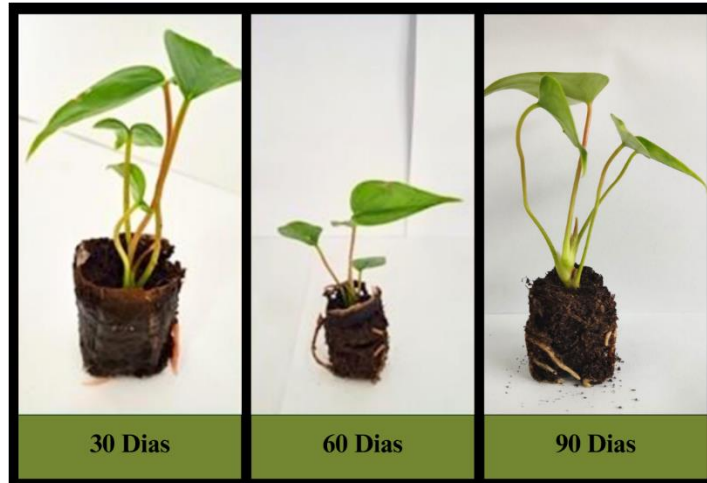


Figura 18. Degradação dos compósitos em campo.

Fonte: Acervo pessoal.

5.2.1.1 Altura da planta

Nesta análise foram quantificadas as alturas das plantas em 30, 60 e 90 dias do experimento sendo possível observar as diferenças entre os tratamentos submetidos na Figura 19. A análise de variância (ANOVA) foi aplicada para estimar as diferenças entre os tratamentos, onde entre 30 e 60 dias os tratamentos 0,4, 0,8 e 1,2 não apresentaram diferenças estatísticas entre si. Já com 90 dias o tratamento 0,4 apresentou média inferior aos demais, enquanto 0,8 e 1,2 não diferiram entre si e nem do tratamento com o Ellepot. Os tratamentos com maior concentração 1,6 e o Ellepot diferiram dos demais em 30 e 60 dias com médias com nível de significância de 5%, e em 90 dias o tratamento 1,6 se sobressaiu ao convencional com Ellepot com média superior de acordo com o teste Tukey aplicado.

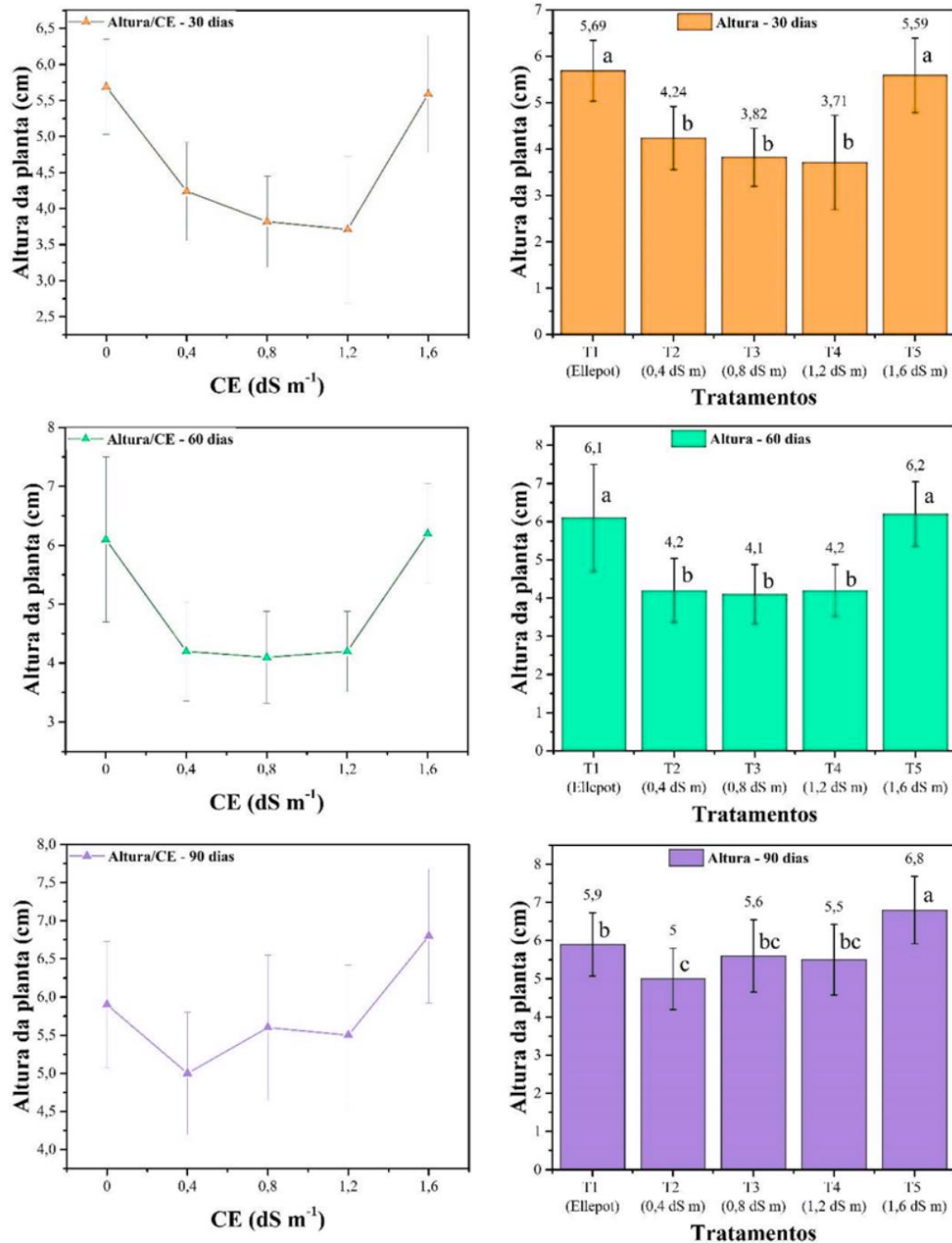


Figura 19. Altura da planta em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Acervo pessoal

A partir dos resultados visuais obtidos é possível notar que as três concentrações iniciais (0,4, 0,8 e 1,2) foram muito semelhantes não sendo satisfatórias ao método convencional com Ellepot, já o tratamento com 1,6 dS.m⁻¹ demonstrou-se superior em 60 e 90 dias de experimento, portanto a influência dos fertilizantes aplicados ao composto biodegradável foi efetiva no crescimento das plantas. Conforme observado por Campos (2017), há uma correlação entre a altura das plantas e a quantidade de fertilizantes aplicada durante a fase inicial de crescimento

da cultura do antúrio. Tanto doses baixas quanto excessivas de fertilizantes apresentam efeitos negativos na altura das plantas, como evidenciado em uma análise realizada ao longo de 90 dias. Esses efeitos podem ser atribuídos tanto à deficiência de nutrientes quanto à salinidade do solo, destacando a importância de uma dosagem equilibrada para promover o desenvolvimento saudável das plantas.

5.2.1.2 Diâmetro da folha maior

A Figura 20 ilustra a análise do diâmetro da maior folha nos dias 30, 60 e 90. A análise de variância (ANOVA) foi empregada para avaliar as discrepâncias entre os tratamentos. Os resultados obtidos para os tratamentos entre 30 e 90 dias mostraram similaridades, onde as doses de 0,4 e 1,2 não apresentaram diferenças estatísticas significativas. Por outro lado, os tratamentos Ellepot e 1,6 foram estatisticamente iguais, segundo o teste Tukey, e diferiram significativamente dos demais. Notavelmente, o tratamento 0,8 não demonstrou diferença significativa em relação aos demais. Ao examinar os dados aos 60 dias, observa-se que os tratamentos 0,4, 0,8 e 1,2 foram estatisticamente iguais, ao nível de significância de 5%, diferindo dos tratamentos Ellepot e 1,6.

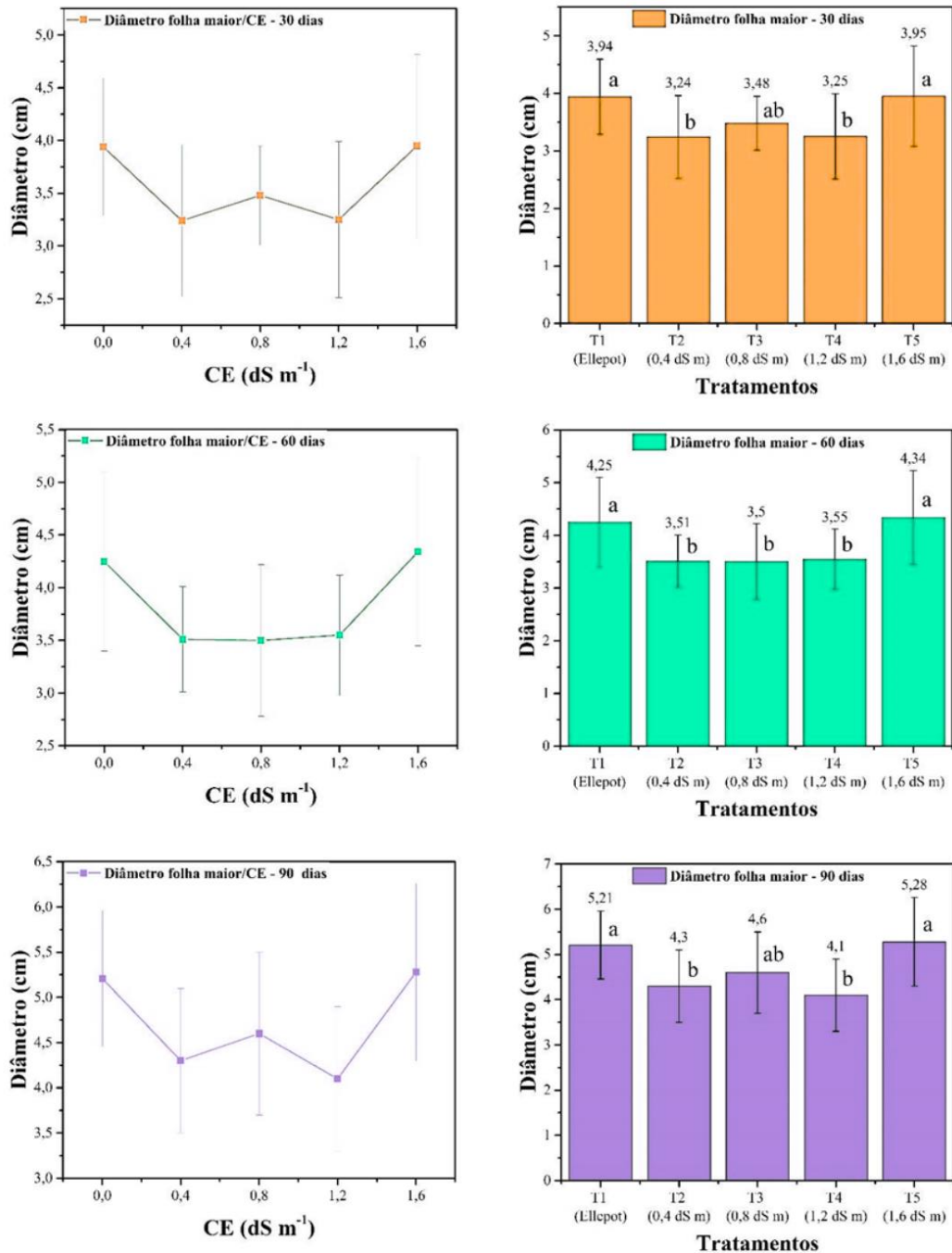


Figura 20. Diâmetro da folha maior em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Acervo pessoal.

No que se refere ao diâmetro da maior folha, observou-se que os tratamentos Ellepot e 1,6 apresentaram medidas superiores, sendo estatisticamente equivalentes entre si. No estágio vegetativo inicial de plantas de antúrio, percebe-se uma variação limitada no fator de crescimento foliar em relação aos tratamentos. Isso sugere que, nessa fase, a planta não demanda uma grande quantidade de nutrientes, sendo a condição hídrica mais determinante. Em cultivos convencionais em estufa, a prática comum é a fertirrigação, na qual o excesso de

fertilizantes pode causar alterações no pH e na disponibilidade de micronutrientes como Zn, Mn, Cu, Fe e Bo. Essas alterações podem resultar em deficiência nutricional e favorecer a toxicidade do substrato (CAMPOS, 2017).

Os nutrientes podem desempenhar um papel significativo no estágio inicial da planta, especialmente na eficiência fotossintética, o que favoreceria o crescimento vegetativo. Isso é observado em variações de condutividade elétrica em sistemas convencionais de mudas com aplicações por irrigação (MELO JÚNIOR et al., 2015). Portanto, a concentração de fertilizantes aplicada em conjunto com os polímeros naturais demonstrou-se próxima ao convencional, especialmente no parâmetro de diâmetro das maiores folhas.

5.2.1.3 Número de folhas

Os gráficos apresentados na Figura 21 abordam o número de folhas das plantas de antúrio em 30, 60 e 90 dias após a aplicação em campo dos materiais. A análise de variância (ANOVA) foi empregada para avaliar as diferenças entre os tratamentos obtidos. Nos primeiros 30 dias, não foram observadas diferenças significativas entre as médias, ao nível de significância de 5%. Entretanto, no período de 60 dias, o tratamento 0,8 apresentou uma média superior aos demais, diferindo estatisticamente do tratamento 1,6, enquanto os tratamentos Ellepot, 0,4 e 1,2 não apresentaram diferenças estatísticas entre si. Aos 90 dias, destaca-se que a média do tratamento com maior concentração (1,6) se sobressaiu em relação aos demais tratamentos.

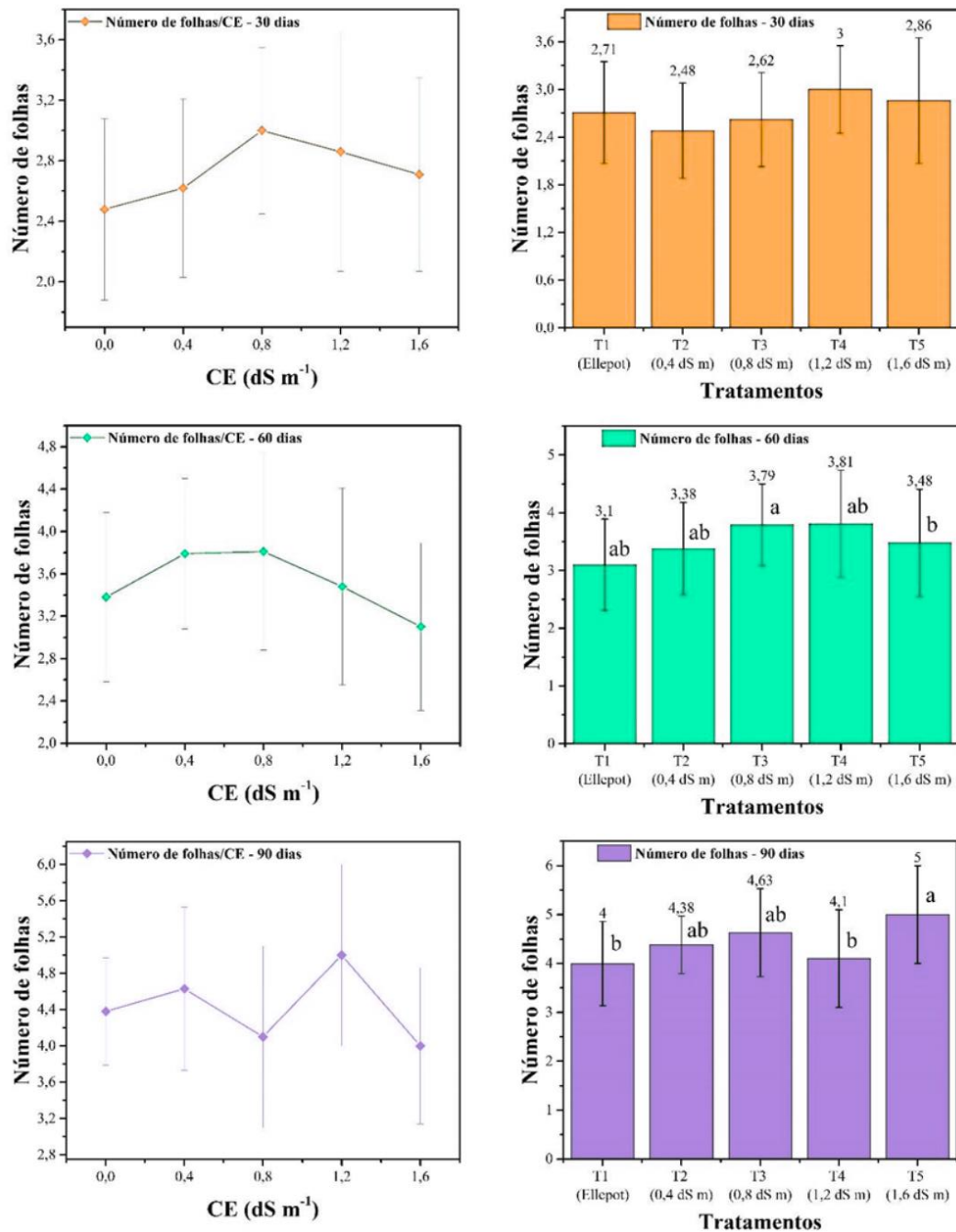


Figura 21. Número de folhas em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Acervo pessoal.

O número de folhas apresentou várias variações ao longo dos três meses de coleta, sendo que a maior concentração de fertilizantes ($1,6 \text{ dS m}^{-1}$) apresentou uma leve redução em comparação aos outros tratamentos. É importante destacar que existe uma relação crucial entre o número de folhas e a produtividade. Quando a condutividade elétrica está elevada, pode ocorrer toxicidade à planta, resultando em danos às raízes. Portanto, ao lidar com fertilizantes convencionais, existem limites de aplicação estabelecidos. O ultrapassar desses limites pode

tornar a planta sensível ao excesso de nutrientes, refletindo diretamente no número de folhas e na cobertura foliar sobre as raízes (CAMPOS, 2017).

5.2.1.4 Massa fresca

A análise da massa fresca permitiu quantificar os efeitos dos diferentes tratamentos em 30, 60 e 90 dias após a aplicação em campo, como demonstrado na Figura 22. A aplicação da análise de variância (ANOVA) possibilitou avaliar as diferenças entre as médias obtidas. Nos 30 dias, os tratamentos 0,4 e 0,8 não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si, mas diferiram do tratamento 1,2. O Ellepot não apresentou diferenças significativas em relação ao 1,2 e ao 1,6, sendo que este último, de maior concentração, destacou-se dos demais. As médias aos 60 dias foram estatisticamente iguais, sem diferenças significativas ao nível de 5%. Ao atingir 90 dias, observou-se que o tratamento 0,4 apresentou uma média inferior, enquanto 0,8 e 1,2 não diferiram entre si. Por outro lado, os tratamentos com Ellepot e 1,6 destacaram-se em relação aos demais, embora não tenham variado estatisticamente entre si, mantendo médias equivalentes ao nível de significância de 5%.

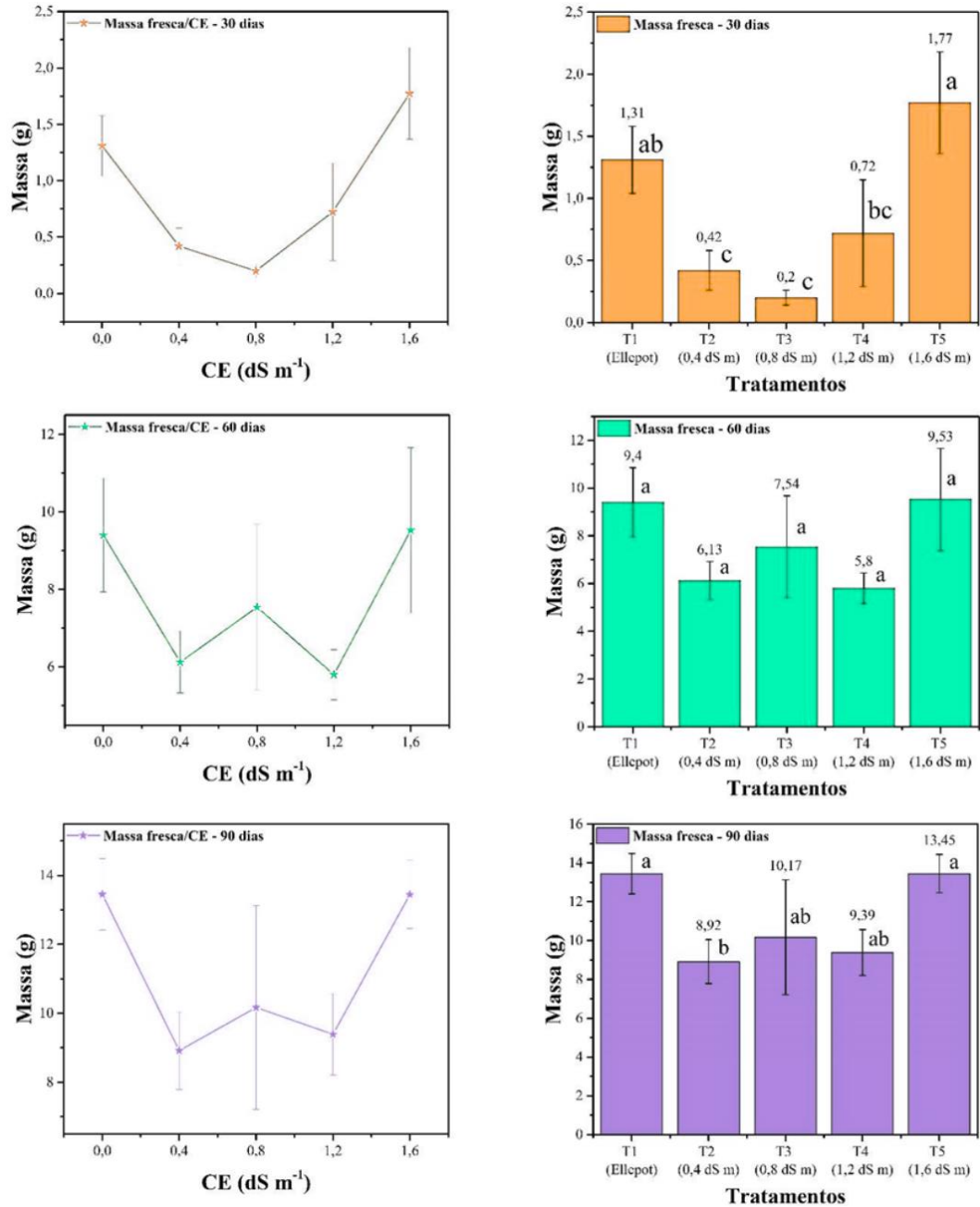


Figura 22. Massa fresca em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Acervo pessoal.

A massa fresca das plantas exibiu médias mais elevadas nos tratamentos Ellepot e 1,6, com um aumento aproximado de 74% entre 30 e 90 dias. Visualmente, não foi observada uma correlação clara com a concentração de fertilizantes, indicando que não houve diferenças significativas em comparação com o envoltório biodegradável convencional de cultivo. Essa constatação sugere que, apesar das variações na concentração de fertilizantes, a resposta em termos de massa fresca não foi diretamente influenciada por essa variável, destacando a eficácia do envoltório biodegradável nos tratamentos Ellepot e 1,6.

5.2.1.5 Massa seca

Os gráficos apresentados na Figura 23 abordam a análise da massa seca obtida dos tratamentos ao longo de 30, 60 e 90 dias. A aplicação da análise de variância (ANOVA) permitiu avaliar as diferentes médias obtidas e suas divergências. Aos 30 dias, não foram observadas variações significativas nas médias, ao nível de significância de 5%. Aos 60 dias, o Ellepot apresentou uma média superior, diferindo dos demais tratamentos. Os tratamentos 0,4 e 1,2 apresentaram médias iguais, enquanto os tratamentos com 0,8 e 1,6 foram superiores e semelhantes entre si. Nos últimos 90 dias, o Ellepot manteve-se superior aos demais tratamentos, sem apresentar diferenças significativas em relação ao tratamento 1,6 e diferindo dos demais.

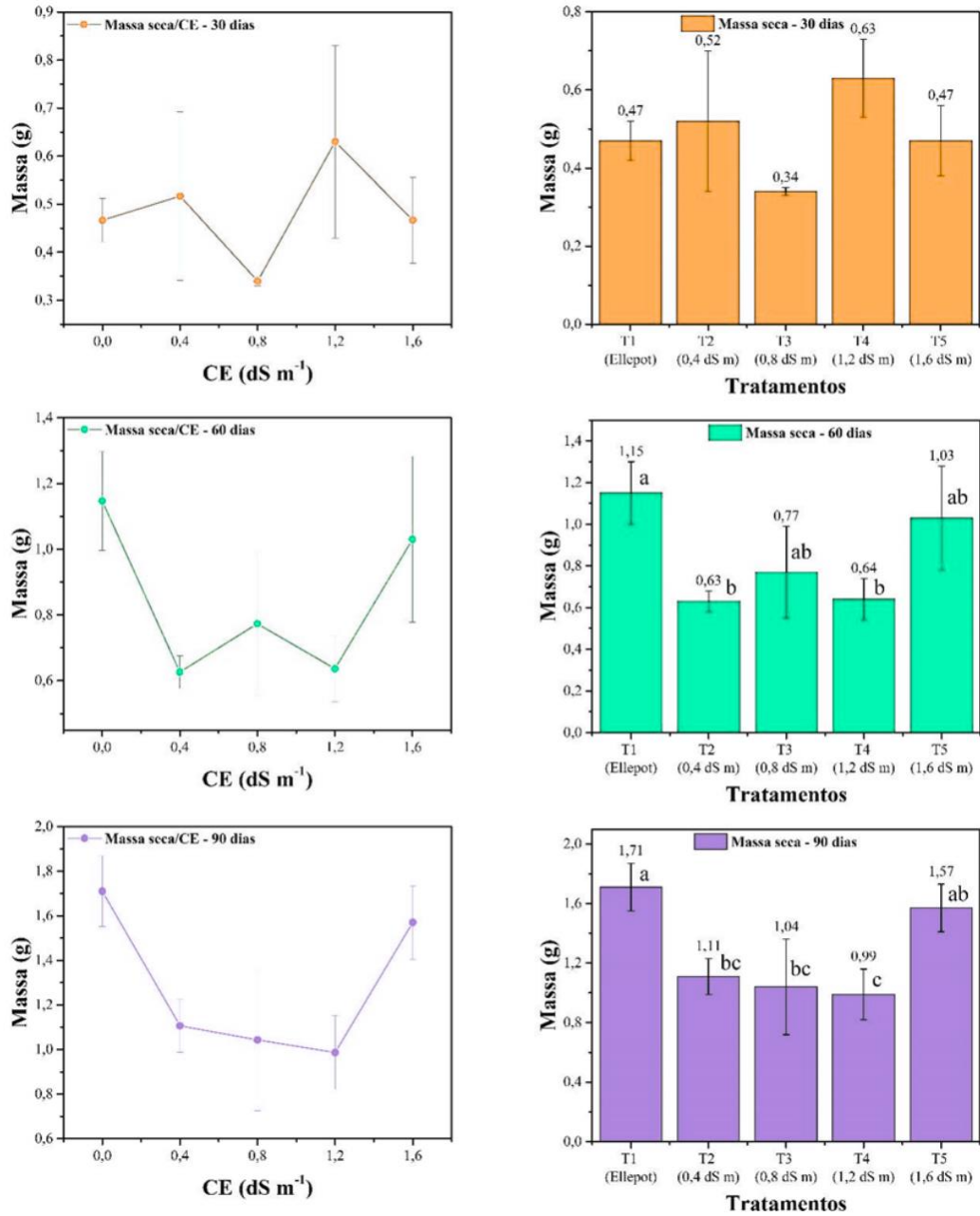


Figura 23. Massa seca em função da condutividade elétrica. Diferentes tratamentos representados por médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Acervo pessoal.

A análise de massa seca segue o padrão observado na análise de massa fresca, com o Ellepot e 1,6 apresentando médias de massa superiores. Notavelmente, os parâmetros de massa não demonstraram correlação significativa com a concentração de fertilizantes. Portanto, uma abordagem potencial para investigação adicional seria a realização de um teste utilizando um composto com o dobro da concentração de fertilizantes, similar ao utilizado na análise de condutividade em água. Esse teste permitiria observar o comportamento da planta e,

posteriormente, realizar uma análise química do tecido vegetal para avaliar mais detalhadamente o impacto da variação na concentração de fertilizantes.

5.2.2 Análise química do substrato e tecido vegetal

A análise química realizada no laboratório não foi satisfatória para a apresentação de dados, indicando a possibilidade de um erro experimental. As concentrações de micro e macronutrientes apresentaram incongruências nas análises disponibilizadas, onde os valores não divergiram significativamente entre si nos diferentes tratamentos e períodos de coleta de 30, 60 e 90 dias em campo. Portanto, seria necessária a repetição do experimento para análise, a fim de estabelecer uma correlação mais confiável entre os resultados dos experimentos de campo e as capacidades fisiológicas do antúrio.

6. CONCLUSÃO

É conclusivo afirmar que o material desenvolvido exibiu características físicas notáveis, destacando-se por sua resistência e sustentabilidade. Sua capacidade de biodegradação o torna uma escolha viável como envoltório para mudas de antúrio. A sinergia entre os polímeros utilizados e os fertilizantes de eficiência aprimorada não apenas impulsionou estudos aprofundados, mas também viabilizou sua aplicação prática em campo, representando uma inovação significativa na agricultura. Essa abordagem não apenas enfrenta questões como a poluição do solo, mas também contribui para a redução de perdas de fertilizantes no meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFÁZ, D. C. S.; BERTOLAZI, K. B.; VIANI, R. A. G.; SOUZA, C. F. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. *Ambiente e Água*, v. 12, n. 1, p. 112, 2017.
- AIRES, R. F.; SILVA, S. D. A.; EICHOLZ, E. D. Análise de crescimento de mamona semeada em diferentes épocas. *Ciência Rural*, v. 41, n. 8, p. 1347-1353, 2011.
- ANGELO, L. M.; FRANÇA, D; FAEZ, R. Biodegradation and viability of chitosan-based microencapsulated fertilizers. *Carbohydrate Polymers*. 257, p. 1-9, 2021.
- Associação Brasileira da Indústria do Plástico – ABIPLAST. *Preview 2021: As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil*. São Paulo: Abiplast, 2021. 4p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 14283: Resíduos em solos - Determinação da biodegradação pelo método respirométrico. Rio de Janeiro, 1999.

AZEVÊDO, Luciana Cavalcanti de et al. Propriedades do amido e suas aplicações em biopolímeros. p. 351–358, 2018.

BARROS, S. Síntese e caracterização de nanocelulose a partir da folha de abacaxi. Dissertação (Mestrado), programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.

BATISTA, T.; CANSADO, I.P.P.; TITA, B.; ILHÉU, A.; METROGOS, L.; MOURÃO, P.A.M.; NABAIS, J.M.V.; CASTANHEIRO, J.E.; BORGES, C.; MATOS, G. Dealing with Plastic Waste from Agriculture Activity. *Agronomy*, v. 12, n. 1, p. 1-12, 2022.

BOSCHETTI, W. Produção e caracterização de nanocristais e microcristais de celulose e sua aplicação em adesivos de uréia-formaldeído. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, à Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

BOTARO, V. R.; RODRIGUES, J. S. Hidrogéis derivados de polímeros naturais: desenvolvimento e aplicações. São Carlos: Edufscar, 2021. 235 p.

CAMPOS, Arlene Santisteban. Lâmina e frequência de irrigação, substrato e adubação na aclimatização de mudas micropropagadas de antúrio (*Anthurium maricense*). Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2017.

CANEVAROLO, S. V. Técnicas de Caracterização de Polímeros. São Paulo: Artliber, 2003.
CHAGAS, Gabriella Neto. Produção de filamentos para impressão 3d de artefatos agrícolas de liberação controlada a partir de fertilizante mineral alternativo e ureia. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023.

CHIROMITO, E.M.S.; TROVATTI, E.; CARVALHO, A.J.F. Water-based processing of fiberboard of acrylic resin composites reinforced with cellulose wood pulp and cellulose nanofibrils. *Journal of Renewable Materials*, v. 7, n. 5, p. 403-413, 2019.

COSTA, E. K. C.; CONCEIÇÃO, I. S. R.; SILVA, R. J.; DRUZIAN, J. I. Estudo prospectivo relativo a depósitos de patentes relacionadas à produção de filmes elaborados pela técnica de casting. *Cadernos de Prospecção*, v. 9, n. 3, p. 280-286, 2016.

COSTA, M. L. Análise Térmica na Caracterização de Materiais. Palestra realizada na CBRATEC 2016 – SP – Disponível em: <<http://www.analisestermicas.com.br/>>. Acesso em: 14 de junho de 2023.

DAMASIO, R. Caracterização e aplicações de celuloses nanofibrilada (cnf) e nanocristalina (cnc). Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal Viçosa, Minas Gerais, 2015.

ELLEPOT. Grow Smarter. Um sistema integrado de plantio. Disponível em: <<https://www.ellepot.com/pt>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

ELLEPOT. Um sistema de propagação exclusivo. Disponível em: <https://www.ellepot.com/pt/produtos-ellepot/>. Acesso em: 26 jun. 2022.

EZATI, P.; RIAHI, Z.; RHIM, J.W. Carrageenan-based functional films integrated with cuo doped titanium nanotubes for active food-packaging applications. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, n. 28, p. 9300-9307, 2021.

FREITAS, T.A.S.; Barroso, D.G.; Carneiro, J.G.A.; Penchel, R.M.; Lamônica, K.R.; Ferreira, D.A. Desempenho radicular de mudas de eucalipto produzidas em diferentes recipientes e substrato. *Revista Árvore*, v. 29, n. 6, p. 853-861, 2006.

Fundo Mundial Para a Natureza - WWF. Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico. 2019. WWF. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>>. Acesso em: 8 jun. 2022.

GÓMEZ-ORDÓÑEZ, E.; RUPÉREZ, P. FTIR-ATR spectroscopy as a tool for polysaccharide identification in edible brown and red seaweeds. *Food Hydrocolloids*, v. 25, n. 6, p. 1514-1520, 2011.

HECHT, H.; SREBNIK, S. Structural Characterization of Sodium Alginate and Calcium Alginate. *Biomacromolecules*, v. 17, n. 6, p. 2160-2167, 2016.

Instituto Brasileiro de Floricultura - IBRAFLOR. O mercado de flores no brasil. Holambra: Ibraflor, 2022. 4p.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. ODS – Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: Ipea, 2018.

JAVAID, M., HALEEM, A., SINGH, R. P., et al. “Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability”. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. v. 4, n. 4, pp. 312-322, 1 out. 2021.

KHALIL, H. P. S. A.; TYE, Y. Y.; SAURABH, C. K.; LEH, C. P.; LAI, T. K.; CHONG, E. W. N.; FAZITA, M. R. N.; HAFIIDZ, J. M.; BANERJEE, A.; SYAKIR, M. I. Biodegradable polymer films from seaweed polysaccharides: a review on cellulose as a reinforcement material. *Express Polymer Letters*, v. 11, n. 4, p. 244-265, 2017.

KHAN, A Z; KHAN, Z.; PATLE, S; REWATKAR, K.G.; ZODAPE, S. FTIR spectral analysis of glycine doped ammonium dihydrogen phosphate (ADP) crystal. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1913, n. 1, p. 012028, 2021.

LEE, Y.; ZHANG, H.; YU, H-Y.; TAM, K.C. Electroconductive cellulose nanocrystals — Synthesis, properties and applications: a review. *Carbohydrate Polymers*, v. 289, p. 1-18, 2022.

Lima, R. M. F. de, & Souza, V. V. de. Polímeros Biodegradáveis: Aplicação na Agricultura e sua Utilização como Alternativa para a Proteção Ambiental. *Revista Agrogeoambiental*, 3(1), 2011.

LORIATO, Arthur Cardozo. Desenvolvimento inicial de plantas de café arábica (*Coffea arabica* L.) obtidas do sistema papperpots (ELLEPOT®) de produção de mudas. 2023.

MAJEED, Z.; RAMLI, N. K.; MANSOR, N.; MAN, Z. A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled release fertilizer processes. *Rev Chem Eng*, 31(1), p. 69-95, 2015.

MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, n. 1, p. 137, 2010.

MELO JÚNIOR, J. C. F. et al. Efeito de níveis de depleção de água no substrato e doses de fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de maracujazeiro amarelo. *Irriga*, v. 20, n. 2, p. 204-219, 2015.

MENG, F.; ZHANG, Y.; XIONG, Z.; WANG, G.; LI, F.; ZHANG, L. Mechanical, hydrophobic and thermal properties of an organic-inorganic hybrid carrageenan-polyvinyl alcohol composite film. *Composites Part B: Engineering*, v. 143, p. 1-8, 2018.

MEZZOMO, J. C. Potencial silvicultural de espécies nativas florestais sob doses de fertilizante de liberação controlada e volume de recipiente, em viveiro e no campo. 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2016.

NECAS, J.; BARTOSIKOVA, L. Carrageenan: a review. *Veterinární Medicína*, v. 58, n. 4, p. 187-205, 2013.

NOMURA, E. S.; LIMA, J. D.; RODRIGUES, D. S.; GARCIA, V. A.; FUZITANI, E. J.; SILVA, S. H. M. Crescimento e produção de antúrio cultivado sob diferentes malhas de sombreamento. *Ciência Rural*, v. 39, n. 5, p. 1394-1400, 2009.

OWEN. Astley; ELISABETH, Chanliaud; ATHENE Donald; MICHAEL Gidley. Structure of *Acetobacter* cellulose composites in the hydrated state. *International Journal of Biological Macromolecules*. Volume 29, Issue 3, 22 October, Pages 193-202, 2011.

PAȘCALĂU, V.; POPESCU, V.; POPESCU, G. L.; DUDESCU, M. C.; BORODI, G.; DINESCU, A.; PERHAIÑA, I.; PAUL, M. The alginate/k-carrageenan ratio's influence on the properties of the cross-linked composite films. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 536, p. 418-423, 2012.

PAWAR, S. N.; EDGAR, K. J. Alginate derivatization: a review of chemistry, properties and applications. *Biomaterials*, v. 33, n. 11, p. 3279-3305, 2012.

PETRUZ, Alessandra. BIOPOLÍMEROS FERTI-LIBERADORES: uma proposta de recipiente no cultivo de mudas de antúrio. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, Araras, 2023.

PRADELLA, J. G.C. Biopolímeros e Intermediários Químicos. São Paulo: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – MDIC. Centro de Tecnologia de Processos e Produtos. 2006. p 1 – 119. (Relatório Técnico nº 84 396-205). 2006. Acesso em: < www.anbio.org.br/pdf/2/tr06_biopolimeros.pdf >

R CORE TEAM, 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

REETZ, H. F. Fertilizantes e o seu uso eficiente. São Paulo: Associação Nacional Para Difusão de Adubos - Anda, 2017.

SAMARASEKARA, A.M.P.B.; KAHAVITA, K.D.H.N.; AMARASINGHE, D.A.; KARUNANAYAKE, L. Fabrication and characterization of nanofibrillated cellulose (nfc) reinforced polymer composite. 2018 Moratuwa Engineering Research Conference (Mercon), p. 449-454, 2018

SAMYN, P.; BARHOUM, A.; ÖHLUND, T.; DUFRESNE, A. Review: nanoparticles and nanostructured materials in papermaking. *Journal of Materials Science*, v. 53, n. 1, p. 146-184, 2017.

SANTOS, R. B. Estudo do comportamento difusional de nutrientes em filmes de revestimento poliméricos: compreensão de processos de liberação controlada de fertilizantes. 2019. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SANTOS, R., RIBEIRO, J., CARVALHO, J., MAGALHÃES W., PEDROTI, L., NALON G., LIMA, G. Nanofibrillated cellulose and its applications in cement-based composites: A review. *Construction and Building Materials*, Volume 288, 123122, 2021.

SCHUMACHER, M. V.; VIEIRA, M. *Silvicultura do Eucalipto no Brasil*. Santa Maria: Editora UFSM, 2016.

SIKORSKI, P.; MO, F.; SKJÅK-BRÆK, G.; STOKKE, B. T. Evidence for Egg-Box-Compatible Interactions in Calcium–Alginate Gels from Fiber X-ray Diffraction. *Biomacromolecules*, v. 8, n. 7, p. 2098-2103, 2007.

SILVA, C. F. B.; CARVALHO, A. C. P. P.; CASTRO, A. C. R.; TANIGUCHI, C. A. K.; DIAS-PINI, N. S.; MIRANDA, F. R.; PASTORI, P. L.; ALVES, F. H. N. S.; CAMPOS, A. S. *Produção de Antúrio para Folhagem em Vaso*. Circular técnica 48, Fortaleza: Embrapa, 2019.

SILVA, L. S.; POCOJESKI, E.; CERETTA, C. A.; BUNDT, A. C.; KAEFER, S.; MARCHESAN, E. Teores de macronutrientes em cultivares de arroz irrigado de acordo com a parte da planta analisada e do estágio de desenvolvimento. **Revista Ceres**, v. 59, n. 4, p. 544-549, 2012.

SILVA, M. L. T.; BRINQUES, G. B.; GURAK, P. D. Desenvolvimento e caracterização de bioplásticos de amido de milho contendo farinha de subproduto de broto. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 23, p. 1-13, 2020.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecology and Management*, v. 301, p. 67-78, 2013.

SOLOMONS, G, FRYHLE, C. *Química orgânica*. 8ed. Rio de Janeiro: LTC, p 487, 2005.

SOUZA, C. F.; BASTOS, R. G.; GOMES, M. P. M.; PULSCHEN, A. A. Eficiência de estação de tratamento de esgoto doméstico visando reuso agrícola. *Ambiente*, v. 10, n. 3, p. 587-597, 2015.

TIBOLLA, H. Produção de nanofibras de celulose por hidrólise enzimática. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP, 2014.

TOMBOLATO, A.F.C.; FURLANI, P.R.; CASTRO, C.E.F.; MATTHES, L.A.F.; TAGLIACOZZO, G.M.D.; SAES, L.A.; RIVAS, E.B.; COUTINHO, L.N.; BERGMANN, E. C.; IMENES, S.D.L.; COSTA, A.M.M.; LEME, J.M. Antúrio: *Anthurium andraeanum* Lind. In: TOMBOLATO, A.F.C. Cultivo Comercial de Plantas Ornamentais. Campinas: Instituto Agrônômico. p. 62-94, 2004.

ULRICH, G.D.; FAEZ, R. Thermal, Mechanical and Physical Properties of Composite Films Developed from Seaweed Polysaccharides/Cellulose Nanofibers. *Journal of Polymers and The Environment*, p. 1-13, 2022.

WU, H., MEHRABI, H., KARAGIANNIDIS, P., et al. "Additive manufacturing of recycled plastics: Strategies towards a more sustainable future", *Journal of Cleaner Production*, v. 335, 10 fev. 2022.

WYPIJ, M.; TRZCIŃSKA-WENCEL, J.; GOLIŃSKA, P.; AVILA-QUEZADA, G.D.; INGLE, A.P.; RAI, M. The strategic applications of natural polymer nanocomposites in food packaging and agriculture: chances, challenges, and consumers' perception. *Frontiers In Chemistry*, v. 10, p. 1-18, 2023.

YE, Z.; MA, P.; TANG, M.; LI, X.; ZHANG, W.; HONG, X.; CHEN, X.; CHEN, D. Interactions between calcium alginate and carrageenan enhanced mechanical property of a natural composite film for general packaging application. *Polymer Bulletin*, v. 74, n. 8, p. 3421-3429, 2017.

ZIA, K. M.; TABASUM, S.; NASIF, M.; SULTAN, N.; ASLAM, N.; NOREEN, A.; ZUBER, M. A review on synthesis, properties and applications of natural polymer-based carrageenan blends and composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 96, p. 282-301, 2017.