4º Congresso Internacional sobre Materiais Plásticos Compostáveis e de Fonte Renovável
11 e 12 de junho de 2025

ID.BIO.18 - HIDROGEIS DE FONTE RENOVÁVEL COMO ALTERNATIVA AOS POLÍMEROS SINTÉTICOS NA RETENÇÃO DE ÁGUA .

Resumo

O uso de hidrogéis sintéticos na agricultura, geralmente formulados a partir de poliacrilatos derivados do petróleo, embora eficiente na retenção de água, levanta preocupações ambientais devido à sua baixa biodegradabilidade e ao acúmulo de resíduos potencialmente tóxicos no solo. Em contrapartida, o desenvolvimento de hidrogéis baseados em biopolímeros naturais e resíduos agroindustriais surge como uma alternativa sustentável, alinhada aos princípios da economia circular e da valorização de resíduos. Essa abordagem permite o reaproveitamento de subprodutos agrícolas, como casca de aveia, tanino e amido, na formulação de hidrogéis biodegradáveis, com propriedades funcionais semelhantes às dos materiais sintéticos, porém com menor impacto ambiental e maior compatibilidade com processos de compostagem. Este trabalho teve como objetivo avaliar o grau de intumescimento em água e a solubilidade de hidrogéis obtidos por extrusão reativa, compostos por amido, celulose, gelatina, carboximetilcelulose, tanino e casca de aveia, utilizando ácido cítrico como agente de reticulação. A capacidade de intumescimento foi determinada por meio da imersão das amostras em água por até 72 horas. Todas as formulações apresentaram elevada capacidade de absorção e boa estabilidade estrutural. A amostra H1, composta por amido, celulose, gelatina e casca de aveia, destacou-se com o maior grau de intumescimento (244% em 24 horas), atribuído à alta afinidade hidrofílica de seus componentes e à estrutura porosa gerada durante o processamento. A amostra H2, contendo carboximetilcelulose e fibras vegetais, apresentou intumescimento intermediário (177%) com absorção gradual ao longo do tempo. A análise de solubilidade revelou que a amostra H1 também teve a maior taxa (37,76%), o que favorece a liberação mais rápida de água e nutrientes no solo, enquanto a amostra H2 apresentou menor solubilidade (26,17%), indicando maior resistência à degradação e maior persistência no solo. A ausência de aditivos sintéticos ou hidrofóbicos resultou em materiais altamente hidrofílicos e compatíveis com ambientes de compostagem. Os resultados indicam que os hidrogéis produzidos são alternativas viáveis aos polímeros convencionais, com vantagens tanto ambientais quanto funcionais, e reforçam a importância do aproveitamento de resíduos agroindustriais na formulação de bioprodutos destinados à agricultura sustentável.

Palavras-chave: Hidrogéis naturais**,** retenção de umidade no solo**,** valorização de resíduos agroindustriais

1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas globais, impulsionadas por atividades antrópicas, têm agravado os efeitos de estresse hídrico sobre ecossistemas agrícolas, com impactos significativos na produtividade vegetal, na dinâmica microbiana do solo e nos serviços ecossistêmicos associados [1–5]. Em particular, a escassez hídrica recorrente compromete processos fisiológicos fundamentais das plantas, reduzindo a eficiência fotossintética, o crescimento e o rendimento das culturas [5–8]. Para mitigar tais impactos, soluções tecnológicas voltadas à conservação de água no solo têm sido amplamente estudadas, entre elas, os hidrogéis superabsorventes destacam-se como ferramentas promissoras na agricultura sustentável.

Hidrogéis são redes poliméricas tridimensionais compostas por cadeias hidrofílicas reticuladas capazes de absorver grandes volumes de água e liberá-la gradualmente conforme as condições do solo [9–11]. Quando aplicados ao solo, esses materiais promovem retenção de umidade, reduzem perdas por lixiviação e favorecem a disponibilidade de nutrientes, além de potencializarem a emergência e o crescimento inicial de plântulas [9, 12, 13]. No entanto, os hidrogéis convencionalmente utilizados na agricultura são, em sua maioria, derivados de polímeros sintéticos, como os poliacrilatos, cujos subprodutos de degradação apresentam baixa biodegradabilidade e riscos ecotoxicológicos cumulativos [10, 14–16].

Diante da crescente preocupação com a poluição por resíduos plásticos persistentes no solo e na água, torna-se imperativa a substituição de polímeros sintéticos por alternativas de origem renovável, biodegradáveis e compatíveis com ciclos naturais, como a compostagem. Nesse contexto, biopolímeros naturais como o amido, a celulose, a gelatina e seus derivados têm se destacado como matérias-primas versáteis para a formulação de hidrogéis ambientalmente seguros, com propriedades funcionais comparáveis às dos materiais sintéticos [17, 18].

A incorporação de resíduos agroindustriais, como casca de aveia, tanino e fibras vegetais, além de ampliar o desempenho técnico dos hidrogéis, agrega valor a subprodutos da cadeia agrícola, promovendo práticas alinhadas à bioeconomia circular [19–21]. O uso de rotas limpas de processamento, como a extrusão reativa, permite ainda a fabricação contínua desses materiais com baixo consumo energético e mínima geração de efluentes, favorecendo sua aplicação em escala industrial.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar hidrogéis superabsorventes biodegradáveis formulados a partir de biopolímeros naturais e resíduos agroindustriais. Os materiais foram obtidos por extrusão reativa, utilizando ácido cítrico como agente de reticulação, visando sua aplicação como substitutos funcionais aos hidrogéis plásticos convencionais em sistemas agrícolas sustentáveis.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e caracterizar hidrogéis superabsorventes biodegradáveis a partir de biopolímeros naturais e resíduos agroindustriais, com vistas à substituição de materiais sintéticos na agricultura, promovendo retenção de água no solo, biodegradabilidade e aproveitamento de subprodutos alinhados à bioeconomia circular.

2.2 Objetivos específicos

- Formular diferentes composições de hidrogéis utilizando amido, celulose, gelatina, carboximetilcelulose, tanino, casca de aveia e acido cítrico como reticulante, empregando extrusão reativa como método de processamento;
- Avaliar a capacidade de intumescimento e a solubilidade em água das formulações desenvolvidas;
- Analisar a porosidade dos hidrogéis por meio de técnicas de microtomografia computadorizada;
- Avaliar o efeito dos hidrogéis sobre o crescimento de plântulas de milho e a capacidade de retenção de água no substrato

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Formulação e produção dos hidrogéis

Foram selecionadas duas formulações de hidrogéis superabsorventes biodegradáveis (H1 e H2), compostas por biopolímeros naturais e resíduos agroindustriais. Os componentes utilizados incluíram amido de milho, celulose obtida a partir de casca de aveia tratada com ácido peracético [13], gelatina, carboximetilcelulose (CMC), casca de aveia, tanino de *Acacia mearnsii*, glicerol como plastificante, ácido cítrico como agente de reticulação e MCA4 [17]. A Tabela 1 apresenta a composição detalhada das formulações em g/100 g de mistura seca:

Componente	**H1 (g/100g)**	**H2 (g/100g)**
Amido	50	35
Celulose	10	5
Gelatina	10	10
Carboximetilcelulose (CMC)	0	5
Casca de aveia	5	5
Tanino	0	5
Ácido cítrico	5	5
Glicerol	15	15

Tabela 1. Composição das formulações H1 e H2.

As formulações foram preparadas por homogeneização manual dos ingredientes, seguida de extrusão reativa em extrusora monorrosca de bancada (EL-25, BGM, Brasil), com perfil de temperatura de 90/110/110/110 °C (zona de alimentação à matriz) e rotação de 35 rpm. Após a extrusão, os filamentos foram secos em estufa com circulação de ar a 60 °C por 24 horas e peletizados para as análises subsequentes.

3.2 Determinação do grau de intumescimento

O grau de intumescimento dos hidrogéis foi determinado pelo método do sachê, conforme descrito por Zhang et al. (2018) [22]. Cerca de 3 g de amostra seca foram colocados em bolsas de malha de poliéster (7 × 9 cm) e imersos em 100 mL de água destilada a 25 °C. As amostras foram retiradas em tempos de 0,5 h, 1 h, 24 h, 48 h e 72 h, secas superficialmente com

papel filtro e pesadas. O grau de intumescimento (%) foi calculado com base na diferença de massa entre o estado seco e o hidratado. Os ensaios foram realizados em quintuplicata.

3.3 Solubilidade em água

A solubilidade foi determinada segundo metodologia adaptada de Mantovan et al.(2021) [23]. Aproximadamente 2 g de amostra seca foram imersos em 100 mL de água a 25 °C por 24 horas. O resíduo insolúvel foi seco a 105 °C até massa constante e pesado. A solubilidade foi expressa como a porcentagem da fração dissolvida em relação à massa inicial da amostra.

3.4 Análise de porosidade por microtomografia

A porosidade total, aberta e fechada das amostras foi determinada por microtomografia computadorizada de raios-X (SkyScan 1172, Bruker, Bélgica). As imagens foram reconstruídas em 3D utilizando software proprietário para quantificação dos parâmetros morfológicos. As análises foram conduzidas em triplicata.

3.5 Avaliação do crescimento de plântulas

O desempenho agronômico dos hidrogéis foi avaliado por meio de testes de germinação de sementes de milho (híbrido Pioneer 3310VYHR). Vasos contendo 50 g de substrato (solo:areia, 2:1) receberam os hidrogéis H1 ou H2 previamente hidratados por 24 horas. Foram semeadas duas sementes por vaso e os ensaios foram conduzidos em câmara de incubação a 28 °C com iluminação UV por 15 dias. Um grupo controle (sem hidrogel) foi utilizado para comparação. Foram mensurados o comprimento das raízes e a altura das plântulas em intervalos de três dias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Grau de intumescimento

O grau de intumescimento é um parâmetro crítico para aplicações agrícolas, pois determina a capacidade do hidrogel de absorver e disponibilizar água às plantas em condições de déficit hídrico. No presente estudo, todas as amostras mantiveram estabilidade estrutural durante o período de 72 horas de imersão em água, demonstrando integridade físico-química suficiente para uso em campo.

A amostra H1 apresentou o maior grau de intumescimento, atingindo 244% em 24 horas, enquanto H2 atingiu 201%. Essa diferença pode ser atribuída à maior proporção de amido e gelatina em H1 e à ausência de carboximetilcelulose (CMC) e tanino, o que conferiu maior mobilidade à rede polimérica e aumentou a afinidade com moléculas de água. Em contraste, a presença de CMC em H2 promoveu maior densidade reticulada, o que restringe a penetração de água e reduz a taxa de intumescimento [24, 25].

Segundo Kalendova et al. (2021) [11], amidos de diferentes origens apresentam variação na capacidade de formação de redes hidratáveis. Quando combinados com polímeros proteicos como a gelatina, essa capacidade pode ser amplificada pela formação de pontes de hidrogênio e interações físicas, como observado na formulação H1. Já o uso de CMC e tanino em H2, embora aumente a resistência mecânica, pode limitar a expansão da matriz polimérica, o que explica o comportamento menos expansível dessa amostra.

4.2 Solubilidade em água

A solubilidade em água é um parâmetro determinante para estimar a durabilidade do hidrogel no solo, sua capacidade de liberação de nutrientes e água, além da interação com microrganismos e matéria orgânica. No presente estudo, a amostra H1 apresentou maior solubilidade (37,76%), enquanto H2 demonstrou menor taxa de solubilização (26,17%). Esses resultados indicam que H1 forma uma matriz polimérica menos densamente reticulada, permitindo maior liberação de fragmentos hidrossolúveis, enquanto H2 apresenta uma estrutura mais coesa e resistente à dissolução.

A maior solubilidade observada em H1 pode ser atribuída à sua composição, que contém maior proporção de amido e ausência de carboximetilcelulose (CMC) e tanino. O amido é um polímero natural amplamente utilizado em hidrogéis devido à sua alta capacidade de absorção de água, porém sua estrutura pouco ramificada favorece a lixiviação de partes solúveis quando não há reticulação intensiva. A ausência de agentes reticulantes adicionais, como tanino ou CMC, reduz a densidade de ligações cruzadas, facilitando a difusão de água e a liberação de fragmentos do material no meio [23, 26].

Por outro lado, a formulação H2 contém CMC e tanino, ambos com reconhecida capacidade de formar interações físicas e químicas que aumentam a densidade da rede polimérica. A CMC, além de contribuir para a resistência mecânica, possui grupos carboxila que podem interagir com cadeias de amido e gelatina por pontes de hidrogênio, formando uma estrutura menos susceptível à solubilização. Já o tanino, por sua natureza polifenólica, forma complexos hidrofóbicos com proteínas e polissacarídeos, reduzindo a disponibilidade de grupos hidrofílicos livres e, consequentemente, a afinidade com a água [13, 23].

A baixa solubilidade de H2 confere à formulação maior resistência à degradação hidrolítica, o que pode ser benéfico em aplicações de longa duração, onde se deseja manutenção da estrutura do hidrogel por ciclos contínuos de irrigação ou chuva. Além disso, hidrogéis menos solúveis têm menor risco de serem transportados por lixiviação para camadas mais profundas do solo, o que é especialmente importante em solos arenosos ou sujeitos à irrigação excessiva.

Por outro lado, a maior solubilidade da amostra H1 representa uma vantagem em sistemas de cultivo de ciclo curto ou em etapas iniciais da germinação, nas quais é desejável rápida disponibilização de umidade e liberação de compostos dissolvidos, como nutrientes ou bioinsumos associados. Essa característica também pode favorecer a degradação do material via compostagem, ao final de sua vida útil no solo, contribuindo para a ciclagem de nutrientes e a redução de resíduos agrícolas.

Portanto, a escolha entre hidrogéis com maior ou menor solubilidade dependerá da estratégia de manejo hídrico adotada, do tipo de cultura e das características do solo. Em ambos os casos, a ausência de polímeros sintéticos ou componentes tóxicos nas formulações estudadas indica que os hidrogéis H1 e H2 são ambientalmente seguros e compatíveis com sistemas de agricultura sustentável.

4.3 Análise de porosidade

A análise de porosidade por microtomografia revelou que ambas as formulações apresentaram porosidades totais semelhantes, sem diferenças estatísticas significativas. No entanto, H1 apresentou uma distribuição mais homogênea de poros abertos, o que favorece a difusão de água e gases. A maior prevalência de poros fechados em H2 sugere uma matriz mais densa, compatível com sua menor solubilidade e menor grau de intumescimento.

Segundo Sujka et al. (2016) [27], a configuração e distribuição dos poros influenciam diretamente a dinâmica de absorção e liberação de água. Hidrogéis com poros interconectados promovem melhor absorção inicial e maior taxa de liberação, enquanto estruturas mais fechadas e compactas favorecem a retenção prolongada de umidade. Assim, os dados de porosidade corroboram os resultados de intumescimento e solubilidade observados neste estudo.

4.4 Crescimento de plântulas

A avaliação do crescimento de plântulas é um critério essencial para verificar a eficácia funcional dos hidrogéis como condicionadores de solo. Neste estudo, os hidrogéis H1 e H2 foram testados quanto à sua capacidade de promover o desenvolvimento inicial de plântulas de milho (*Zea mays*), comparando-se seus efeitos ao de um grupo controle (substrato sem hidrogel). Os experimentos foram conduzidos por 15 dias, com coletas a cada três dias, sob condições controladas de temperatura e luminosidade.

Observou-se que a amostra H1 promoveu o maior crescimento radicular médio (2,79 cm) e maior altura da parte aérea das plântulas, enquanto H2 apresentou desempenho intermediário (1,95 cm) e o grupo controle demonstrou desenvolvimento significativamente inferior (0,91 cm). Esses dados indicam que a formulação H1 proporcionou condições mais favoráveis à germinação e ao alongamento radicular, possivelmente devido à sua maior capacidade de absorção e liberação de água, associada à sua maior solubilidade.

A estrutura microporosa e hidrofílica da H1, observada por MEV e confirmada pelos dados de intumescimento, favorece a difusão de água e oxigênio até a zona radicular, promovendo rápida hidratação da semente e ativação dos processos metabólicos necessários à germinação. Além disso, a maior solubilidade da matriz facilita a liberação de possíveis nutrientes e metabólitos bioativos presentes no hidrogel ou no substrato adjacente. Segundo Durpekova et al. (2022) [7], hidrogéis com estrutura porosa e baixa densidade de reticulação são particularmente eficazes na fase de emergência, atuando como reservatórios de água de rápida liberação e microambientes propícios à atividade microbiana benéfica.

Por outro lado, a formulação H2, embora menos eficiente que H1 no estímulo inicial ao crescimento, apresentou maior estabilidade no substrato ao longo do tempo, devido à sua menor solubilidade e maior resistência estrutural. Isso sugere que H2 pode desempenhar papel mais relevante em estágios posteriores do desenvolvimento vegetal, atuando como reservatório de umidade de liberação controlada. Além disso, a presença de tanino em H2 pode ter efeito antimicrobiano moderado, o que pode contribuir para reduzir a pressão de patógenos na rizosfera, como discutido por Moreira et al. (2023) [16].

O grupo controle, por sua vez, apresentou crescimento reduzido e rápida perda de umidade no substrato, reforçando o papel dos hidrogéis como ferramentas eficazes na mitigação do estresse hídrico em estágios críticos do ciclo agrícola.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam o potencial agronômico das formulações desenvolvidas. A formulação H1 mostrou-se mais adequada para aplicação em semeadura direta, sistemas de plantio sob baixa disponibilidade hídrica e cultivos de ciclo curto, nos quais a rápida liberação de água é essencial. Já a formulação H2 apresenta potencial para cultivos de maior duração ou em condições onde se deseja retenção prolongada de umidade, com menor degradação do material no solo ao longo do tempo.

Além do impacto direto no crescimento vegetal, o uso desses hidrogéis formulados com biopolímeros e resíduos agroindustriais representa uma alternativa ambientalmente responsável

frente aos polímeros sintéticos, promovendo práticas alinhadas à agricultura regenerativa, ao reaproveitamento de resíduos e à melhoria da resiliência das lavouras frente às mudanças climáticas.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram o elevado potencial de aplicação de hidrogéis superabsorventes biodegradáveis, produzidos a partir de biopolímeros naturais e resíduos agroindustriais, como alternativas funcionais e ambientalmente seguras aos hidrogéis sintéticos convencionais utilizados na agricultura.

A formulação H1 destacou-se pelo alto grau de intumescimento (244%) e maior solubilidade (37,76%), características que proporcionaram maior eficiência na liberação de água e superior desempenho na promoção do crescimento de plântulas de milho. Sua estrutura microporosa e hidrofílica favoreceu o alongamento radicular e a emergência das sementes, tornando-a indicada para aplicações em estágios iniciais de cultivo ou em sistemas de produção de ciclo curto.

Por outro lado, a formulação H2 apresentou comportamento mais conservador, com menor solubilidade (26,17%) e estrutura mais densa e resistente, conferida pela presença de carboximetilcelulose e tanino. Apesar de apresentar menor crescimento inicial das plântulas em comparação à H1, demonstrou maior estabilidade estrutural, o que pode ser vantajoso em cultivos prolongados ou em regiões de alta lixiviação.

Ambas as formulações apresentaram integridade física adequada, características estruturais compatíveis com a aplicação em campo e ausência de aditivos tóxicos, reforçando seu potencial para uso em práticas agrícolas sustentáveis. A combinação de desempenho técnico, biodegradabilidade e aproveitamento de resíduos agrícolas torna esses materiais compatíveis com princípios da economia circular e da agricultura regenerativa.

Dessa forma, os hidrogéis desenvolvidos neste trabalho representam soluções viáveis para o manejo hídrico em solos agrícolas, contribuindo para a conservação de água, melhoria da eficiência produtiva e redução do impacto ambiental associado ao uso de polímeros sintéticos. Estudos futuros devem focar na validação dessas formulações em escalas maiores, em diferentes tipos de solo e culturas, bem como na avaliação da interação com fertilizantes, microbiota do solo e processos de compostagem.

RECONHECIMENTOS

Os autores agradecem, com reconhecimento, o apoio financeiro da CAPES PROEX (88887.807683/2023-00), do CNPq (306249/2023-5), da Fundação Araucária – NAPI Biodiversidade, Recursos Genéticos e Biotecnologia (20.220.599-2) e do INCT MicroAgro (465133/2014-2). Este trabalho também contou com o suporte da chamada conjunta BiodivERsA 2019–2020. Agradecemos ainda ao Laboratório Multiusuário da Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela infraestrutura e apoio técnico disponibilizados.

REFERÊNCIAS

1. Qamruzzaman M, Ahmed F, Mondal MIH (2022) An Overview on Starch-Based

Sustainable Hydrogels: Potential Applications and Aspects. Springer US

2. Roy T, Kalambukattu JG, Biswas SS, Kumar S (2022) Agro-climatic Variability in Climate Change Scenario: Adaptive Approach and Sustainability. Springer Clim 313–348. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15501-7_12
3. Maia SMF, de Souza Medeiros A, dos Santos TC, et al (2022) Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. Soil Tillage Res 220:. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105368
4. Vercelheze AES, Marim BM, Oliveira ALM, Mali S (2019) Development of biodegradable coatings for maize seeds and their application for Azospirillum brasilense immobilization. Appl Microbiol Biotechnol 103:. https://doi.org/10.1007/s00253-019-09646-w
5. Ali K;, Asad Z;, Agbna GHD;, et al (2024) Progress and Innovations in Hydrogels for Sustainable Agriculture. Agron 2024, Vol 14, Page 2815 14:2815. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14122815
6. Mukhopadhyay R, Sarkar B, Jat HS, et al (2021) Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. J Environ Manage 280:111736. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111736
7. Durpekova S, Bergerova ED, Hanusova D, et al (2022) Eco-friendly whey/polysaccharide-based hydrogel with poly(lactic acid) for improvement of agricultural soil quality and plant growth. Int J Biol Macromol 212:85–96. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.053
8. Nguyen TT, Grote U, Neubacher F, et al (2023) Security risks from climate change and environmental degradation: implications for sustainable land use transformation in the Global South. Curr Opin Environ Sustain 63:101322. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101322
9. Abdel-Raouf ME, El-Saeed SM, Zaki EG, Al-Sabagh AM (2018) Green chemistry approach for preparation of hydrogels for agriculture applications through modification of natural polymers and investigating their swelling properties. Egypt J Pet 27:1345–1355. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.09.002
10. Biduski B, Silva WMF da, Colussi R, et al (2018) Starch hydrogels: The influence of the amylose content and gelatinization method. Int J Biol Macromol 113:443–449. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.144
11. Kalendova P, Svoboda L, Hroch J, et al (2021) Hydrogels Based on Starch from Various Natural Sources: Synthesis and Characterization. Starch/Staerke 73:1–13. https://doi.org/10.1002/star.202100051
12. Ye J, Luo S, Huang A, et al (2019) Synthesis and characterization of citric acid esterified rice starch by reactive extrusion: A new method of producing resistant starch. Food Hydrocoll 92:135–142. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.064
13. Marim BM, Mantovan J, Giraldo GAG, Mali S (2020) Environmentally friendly process based on a combination of ultrasound and peracetic acid treatment to obtain cellulose from orange bagasse. J Chem Technol Biotechnol. https://doi.org/10.1002/jctb.6576
14. Elvira C, Mano JF, San Román J, Reis RL (2002) Starch-based biodegradable hydrogels with potential biomedical applications as drug delivery systems. Biomaterials 23:1955–1966. https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00322-2
15. Manu, Kumar D, Gupta RK (2024) Natural polymers-humic acid and lignin based hydrogels: In agriculture, environment and energy storage. Ind Crops Prod 219:119029.

https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2024.119029

16. Moreira AA, de Carvalho FA, Bilck AP, et al (2023) Tannin improves the processability and delays the biodegradability of poly (lactic acid)-starch-based thermoset materials produced by injection molding made with renewable compounds. J Appl Polym Sci 140:e53815. https://doi.org/10.1002/APP.53815

17. Marcelino PRF, Milani KML, Mali S, et al (2016) Formulations of polymeric biodegradable low-cost foam by melt extrusion to deliver plant growth-promoting bacteria in agricultural systems. Appl Microbiol Biotechnol 100:7323–7338. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7566-9

18. Muhammad M, Tawfic M, Elsabbagh A (2024) Review of design and manufacturing of superabsorbent polymers (SAPs) hydrogel for agriculture in arid areas. Discov Mater 4:. https://doi.org/10.1007/s43939-024-00114-5

19. Nascimento DM (2019) Nanocomposite hydrogels based on nanocellulose for applications in agriculture

20. Chattaraj S, Mitra D, Ganguly A, et al (2024) A critical review on the biotechnological potential of Brewers' waste: Challenges and future alternatives. Curr Res Microb Sci 6:100228. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100228

21. Kaur P, Bohidar HB, Nisbet DR, et al (2023) Waste to high-value products: The performance and potential of carboxymethylcellulose hydrogels via the circular economy. Cellulose 30:2713–2730. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05068-0

22. Zhang H, Yang C, Zhou W, et al (2018) A pH-Responsive Gel Macrosphere Based on Sodium Alginate and Cellulose Nanofiber for Potential Intestinal Delivery of Probiotics. ACS Sustain Chem Eng 6:13924–13931. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02237

23. Mantovan J, Giraldo GAG, Marim BM, et al (2021) Cellulose-based materials from orange bagasse employing environmentally friendly approaches. Biomass Convers Biorefinery. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01279-2

24. Cagnin C, Simões BM, Yamashita F, et al (2021) pH sensitive phosphate crosslinked films of starch-carboxymethyl cellulose. Polym Eng Sci 61:388–396. https://doi.org/10.1002/pen.25582

25. Simões BM, Cagnin C, Yamashita F, et al (2020) Citric acid as crosslinking agent in starch/xanthan gum hydrogels produced by extrusion and thermopressing. Lwt 125:108950. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108950

26. Łupina K, Kowalczyk D, Lis M, et al (2022) Controlled release of water-soluble astaxanthin from carboxymethyl cellulose/gelatin and octenyl succinic anhydride starch/gelatin blend films. Food Hydrocoll 123:. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107179

27. Sujka M, Sokolowska Z, Hajnos M, Wlodarczyk-Stasiak M (2016) Characterization of pore structure of rice grits extrudates using mercury intrusion porosimetry, nitrogen adsorption and water vapour desorption methods. J Food Eng 190:147–153. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.06.023