

Sisaçúcar: Um Açúcar De Agave Sisalana

Clara Rodrigues Da Silva Eloy, Laryssa Barrêto De Azevedo Silva,
Luna Santana Fonseca Lins, André Luís Ramos Da Costa (Orientador),
Tatiana Oliveira Do Vale (Coorientadora)
Colégio Militar De Salvador, Salvador - Ba

Resumo:

O projeto propõe explorar o potencial da planta *Agave sisalana* como uma fonte sustentável e economicamente viável de um açúcar benéfico à saúde, capaz de reduzir o tecido adiposo e manter a saúde bucal, com o desenvolvimento de processos eficientes de extração e purificação do arabitol e da inulina a partir do suco de sisal. Desse modo, há a promoção da sustentabilidade ambiental, o desenvolvimento econômico das regiões produtoras e a higidez do utilizador desse açúcar. A primeira etapa na fabricação do açúcar é a colheita do sisal que inicia-se com o corte e transporte das folhas da planta *Agave sisalana*. Após a colheita, as folhas são levadas para o desfibramento, onde passam por máquinas que separam a polpa das fibras. Posteriormente, é realizado o corte do bagaço e das folhas de sisal em segmentos de aproximadamente 1 cm de comprimento. No procedimento subsequente ocorre a lavagem dos segmentos a fim de eliminar possíveis impurezas e contaminantes. Em seguida, as amostras de sisal são transferidas colocadas dentro de uma estufa de secagem pré-aquecida, ao término do processo de secagem, uma amostra representativa é selecionada e pesada. Consecutivamente, a fim de extrair o arabitol, são realizadas uma série de processos, incluindo extração por solvente, centrifugação, precipitação, filtração e concentração da solução para separar este componente. Após a extração e concentração do material das amostras de sisal, segue-se o processo de purificação e análise, que envolve ajuste de pH, secagem final, calcinação e espectrofotometria para assegurar a qualidade e pureza do composto final. A solução filtrada de inulina e arabitol é então transferida e aquecida em banho-maria a fim de aumentar a concentração dos nutrientes. Posteriormente ocorre a realização da hidrólise da inulina que converte este polissacarídeo em frutose e glicose através das inulinases. O arabitol é isolado ao fim da hidrólise da inulina, incluindo filtração da solução para remover impurezas, seguida da adição de solventes para precipitar o arabitol, e uma nova filtração para separar o precipitado. Utilizando uma estufa de secagem e o arabitol é finalmente cristalizado, obtendo-se assim, o açúcar proveniente de arabitol e inulina.

Palavras-chave: Açúcar. *Agave sisalana*. Arabitol. Inulina. Sisal

Date of Submission: 29-05-2025

Date of Acceptance: 09-06-2025

I. Introdução

Diante do atual panorama que permeia a sociedade global, uma série de pesquisadores tem se dedicado arduamente à busca por soluções promissoras, visando viabilizar a continuidade de produção tecnológica e bem-estar (YASHAS et al, 2019). A demanda por materiais alternativos destinados à produção de bens e serviços tecnológicos têm suscitado uma intensa atividade investigativa na comunidade científica, voltada à identificação de matérias-primas economicamente viáveis, eficientes e ecologicamente sustentáveis;

Um vasto corpo de pesquisa tem enfatizado os méritos dos compósitos poliméricos que incorporam fibras vegetais em várias aplicações tecnológicas de proeminência. Estas aplicações transcendem a mera substituição das fibras de Kevlar em contextos balísticos (NAYAK et al., 2022), abrangendo a fabricação de componentes destinados a helicópteros, aeronaves, satélites e cockpits (KEYA et al., 2019). Ademais, aplicações experimentais no domínio médico também têm sido exploradas com sucesso (MANN et al., 2020), juntamente com o interesse manifestado no setor energético, evidenciado por uma série de estudos recentes (SALES et al., 2020, 2021a, 2021b, 2022; BRITO et al., 2022). Tal diversidade de aplicações reflete a versatilidade e o potencial ainda inexplorado dos compósitos poliméricos com fibras vegetais em múltiplos domínios tecnológicos e industriais.

A planta de sisal (*Agave sisalana*) tem emergido como uma fonte promissora para a produção de açúcar, devido à sua abundância em regiões áridas e semiáridas e ao seu alto teor de sacarose no caule e nas folhas. A *sisalana* ocupa o sexto lugar entre as plantas de fibra, representando 2% da produção mundial de fibras vegetais, com uma produção global aproximada de 240,7 toneladas (MEGIATTO JR, J. D., 2008).

A caracterização dos boles de sisal para a produção de ácido polilático (PLA) mostrou que o suco extraído dos boles de sisal pode ser hidrolisado, permitindo que os polímeros de açúcar se quebrem em açúcares monômeros, com um conteúdo total de açúcar no suco de até 30% (w/v) (Medeiros, M et al, 2024). No suco do sisal existe ainda a presença dos polióis ou alcoóis de açúcares, arabitol e inulina, que podem atuar como agentes anti-cariogênicos e redutores do tecido adiposo.

Portanto, o projeto proposto visa explorar o potencial da planta de sisal como uma fonte sustentável e economicamente viável de um açúcar benéfico, para desenvolver processos eficientes para a extração e purificação do arabitól e da inulina a partir do suco de sisal, bem como avaliar a viabilidade de sua conversão em produtos de valor agregado.

O Sisal, principal fibra dura produzida no mundo, corresponde a cerca de 70% da produção comercial de todas as fibras desta classificação (FAO, 1996); no Brasil, o cultivo das fibrilhas concentra-se na região Nordeste, onde há a predominância de temperaturas média anual de 30°C, velocidade média dos ventos da ordem de 3 m/s, pluviosidade variando entre 400 e 700 mm anuais e umidade relativa média de 60%.

Uma considerável porção da obtenção do Sisal na região Nordeste é feita em propriedades reduzidas, utilizadas para o cultivo através da agricultura familiar. Tais costumam vincular a estadia da população a região semi-árida, servindo muitas vezes como única fonte de renda. A fibra do sisal contribui significativamente para a economia brasileira, gerando cerca de 80 milhões de dólares em divisas, e é responsável por aproximadamente 850 mil empregos diretos e indiretos (SILVA; BELTRÃO, 1999). O tecido adiposo é um tipo especial de tecido conjuntivo responsável pelo armazenamento de gordura. Esta encontra-se nas chamadas células adiposas ou adipócitos, que constituem grandes agregados desse tecido. Os adipócitos são células, como outras células eucariontes, que possuem membrana plasmática, núcleo e organelas membranosas. A característica mais proeminente neles é a presença de gordura no citoplasma que, frequentemente, preenche quase toda essa região, deslocando o núcleo para uma posição mais periférica da célula. Eles são os únicos capazes de armazenar lipídios na forma de triglicerídeos sem que nenhuma de suas funções seja prejudicada.

O tecido armazena lipídios, sendo, portanto, um grande depósito de energia, além disso, garante proteção contra choques mecânicos e atua no isolamento térmico, evitando a perda excessiva de calor ou o aumento exagerado de temperatura. (SANTOS, Vanessa Sardinha dos. SI.). O excesso de tecido adiposo leva a inflamação crônica que pode causar resistência à insulina, hipertensão arterial, doença hepática gordurosa e outras complicações (Renke, 2022).

O comportamento anômalo do tecido adiposo, característico da obesidade, gera um recrutamento de células pró-inflamatórias que participarão do processo de recuperação do tecido danificado. Por essa razão, o tecido adiposo de uma pessoa obesa contém cinco vezes mais macrófagos do que o de uma pessoa não obesa. Existem 2 tipos de macrófagos: Macrófago tipo 1 que é pró-inflamatório (M1) e Macrófago tipo 2 que é anti-inflamatório (M2). O do tipo 2 contribui para a homeostase do tecido, inclusive coordenando a ativação de adipócitos bege que irão contribuir com o gasto de energia no TA (Tecido adiposo). Na obesidade, ocorre uma maior concentração de macrófagos do tipo 1, que aumentam a liberação de citocinas pró-inflamatórias (TNF- α e IL-6).

Figura 1: Figura da resistência a ação da insulina no corpo



Fonte: AURELIO, Dr Marcio, Diabetes Tipo 2: Além do Açúcar - Fatores e Causas

O açúcar de cana, amplamente consumido em diversas formas, é conhecido por seu alto índice glicêmico, o que significa que ele eleva rapidamente os níveis de glicose no sangue após o consumo. Esta característica pode levar a um estado de hiperglicemia, que contribui para o desenvolvimento da resistência à insulina, um precursor da diabetes tipo 2. A resistência à insulina ocorre quando as células do corpo não respondem adequadamente à insulina, o hormônio responsável por facilitar a entrada de glicose nas células para ser convertida em energia. Como resultado, a glicose se acumula no sangue, elevando os níveis de açúcar e exigindo que o pâncreas produza ainda mais insulina.

O açúcar refinado é um substrato energético para bactérias cariogênicas, como o *Streptococcus mutans*, que metabolizam a sacarose e produzem ácidos. Esses ácidos desmineralizam o esmalte dentário, levando à formação de cárie; além disso, o consumo excessivo de açúcar pode levar ao desenvolvimento de tártaro, uma

calcificação da placa bacteriana que se fixa na superfície dos dentes e pode causar inflamação gengival, conhecida como gengivite. A gengivite, se não tratada, pode evoluir para uma condição mais grave, a periodontite, que afeta o tecido de suporte dos dentes e pode levar à perda dentária.

O açúcar do sisal, obtido a partir da *Agave sisalana*, apresenta-se como uma opção promissora, embora não seja amplamente conhecido, este açúcar natural contém compostos que podem ajudar a neutralizar os ácidos bucais, responsáveis pela deterioração do esmalte dos dentes e pelo desenvolvimento de cáries. Além disso, o açúcar de sisal não é fermentável pelas bactérias orais, logo não contribui para a formação de placa bacteriana, uma das principais causas para problemas dentários como gengivite e periodontite.

Em resumo, o açúcar de sisal emerge como uma opção interessante para aqueles que buscam alternativas mais saudáveis para a saúde bucal. Com suas propriedades únicas e benefícios potenciais, ele pode ser uma adição valiosa à rotina de cuidados bucais, contribuindo para a manutenção de dentes e gengivas saudáveis. No entanto, mais pesquisas são necessárias para entender completamente o impacto do açúcar de sisal na saúde bucal e para estabelecer diretrizes claras sobre seu uso seguro e eficaz

II. Materiais E Métodos

Trabalho em conjunto com o CIMATEC

O Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (CIMATEC) é uma instituição de referência em pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica, localizada em Salvador, Bahia. Vinculado ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), o CIMATEC é reconhecido por sua infraestrutura avançada e por sua capacidade de oferecer suporte técnico e científico em diversas áreas da engenharia e tecnologia.

Tabela 1: Materiais utilizados na metodologia

Equipamento	Quantidade	Preço
Sisal	5kg	
Béquer de 1l	3	R\$ 19,28
Béquer de 250ml	2	R\$ 7,82
Tesoura/Estilete	2	R\$ 5,00
Água destilada	5L	R\$ 15,90
Bandeja de plástico	2	R\$ 30,15
Papel toalha	2	R\$ 10,90
Estufa de secagem laboratorial	1	R\$ 3500,00
Balança semi-analítica	1	R\$ 4500,00
Agitador magnético	1	R\$ 1000,00
Barrinhas magnéticas	3	R\$ 5,81
Álcool de Cereais	2L	R\$ 14,90
Centrífuga	1	R\$ 1.083,30
Eppendorf 2 ml	24	R\$75,00 - 1000 u
Funil de filtração	1	R\$ 400,00
Papel filtro	10	R\$ 4,95
Bastão de vidro	3	R\$ 5,50
Banho-maria laboratorial	1	R\$ 2200,00
Ácido Sulfúrico concentrado	1L	R\$ 70,00/L
Moinho de rolos	1	R\$ 3000,00
Etanol absoluto	1L	R\$ 30,00
Tira universal de pH	1	R\$ 25,50
pHmetro	1	R\$ 1500,00
Ácido clorídrico	0,5L	R\$ 30,00
Bicarbonato de sódio	1Kg	R\$ 15,00
Cápsula de porcelana	8	R\$ 16,00
Mufa laboratorial	1	R\$ 6500,00
Espectrofotômetro	1	R\$ 12000,00
Padrão da Inulina	1	
Cubetas de quartzo	2	R\$ 135,00
Sulfato de alumínio		
Levedura Debaryomices	1g/10ml	
Fenol 5%	2L	R\$ 30,00/L
Ácido Dinitrosalicílico	10,6g / Solução	R\$ 212,00 /100g
Hidróxido de Sódio	19,8g / Solução	R\$ 27,00 /500g
Fermento Biológico	50g/solução	R\$ 11,00/200g
Tampão Acetato de Sódio 4.5 pH		R\$ 40,00/500ml
Mesa Agitadora (Shaker)		R\$10.000,00

Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024

Porção do Sisal

O bagaço do Sisal tem alto potencial para obtenção de polióis, compostos alcoólicos empregados na indústria alimentícia, muitas vezes no lugar do açúcar, visando a elaboração de produtos seguros para indivíduos com deficiência na produção de insulina, como os diabéticos. O sisal possui mais celuloses capazes de serem metabolizadas em polióis que a cana-de-açúcar, principal fonte de açúcares atualmente (Medeiros et al., 2020).

A levedura *Debaryomyces hansenii* foi capaz de obter altos valores de produção de arabitól em meio hidrolisado de bagaço de sisal, agregando valor econômico ao bagaço de sisal e reduzindo o impacto ambiental. (Medeiros et al., 2020)

O sisal teve sua inulina extraída, isolada e caracterizada por Apolinário et al. (2017), apresentando prevalência de oligossacarídeos, com grau de polimerização entre 5 e 13. Baseado na produção de inulina pelo sisal, um estudo avaliou o extrato aquoso da planta e descobriu que ele possui potencial prebiótico para bactérias do gênero *Lactobacillus*. A tabela disposta em seguida demonstra a fórmula química de cada um dos compostos, bem como sua localização na planta de sisal.

Folhas de Agave Sisalana

As folhas do sisal são conhecidas por sua robustez e versatilidade, sendo utilizadas em uma variedade de aplicações. A fibra extraída dessas folhas é altamente resistente e é tradicionalmente empregada na produção de cordas, tapetes e diversos outros produtos. Além da fibra, as folhas do sisal contêm compostos bioativos que têm despertado interesse para uso em biotecnologia e medicina. Um desses compostos é o arabitól, álcool de açúcar que pode ser extraído e utilizado. No entanto, o foco deste texto é a própria folha do sisal.

Primeiramente, o projeto beneficiou-se do acesso a equipamentos e utensílios especializados fornecidos pelo centro. A disponibilidade desses recursos tecnológicos foi crucial para a realização das diversas etapas do projeto, permitindo a execução de experimentos e testes com a precisão e o rigor científico necessários.

Além disso, o CIMATEC ofereceu orientação especializada, um aspecto fundamental para o progresso do projeto. A equipe técnica da instituição forneceu suporte técnico de alto nível. Essa orientação especializada foi essencial para a superação de desafios técnicos, contribuindo significativamente para o avanço das atividades do projeto.

Em termos de composição, as folhas do sisal são ricas em celulose, hemicelulose e lignina, componentes chave para a produção de bioprodutos. A presença de resíduos de sisal no solo tem mostrado influenciar positivamente as propriedades químicas do solo, melhorando a fertilidade do solo. Essas características tornam as folhas do sisal um material de grande interesse para o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis (Medina, J. C. - "O sisal", Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, São Paulo, 1954).

Tabela 2: Características de cada composto

Composto	Arabitól (Folhas de Sisal)	Inulina (Caulo do Sisal)
Fórmula química	C5H12O5	(C6H10O5) _n
Tipo de Composto	Álcool de açúcar	Polissacarídeo
Solubilidade	Alto em água	Alto em água
Índice Glicêmico	Baixo	Muito baixo
Benefícios a saúde	Alternativa para diabéticos;	Prebiótico; melhora a saúde intestinal
Aplicações	Alimentos dietéticos; produtos farmacêuticos	Substituto de açúcar; alimentos funcionais

Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024

Preparação da amostra do bagaço

A correta preparação das amostras é crucial para garantir a precisão e a validade dos resultados em estudos científicos. Abaixo estão descritas as etapas detalhadas para coleta, corte e lavagem do sisal, destacando os materiais específicos e os procedimentos utilizados:

A coleta das folhas de sisal é um processo realizado com o uso de tesouras de poda esterilizadas e luvas de proteção para garantir manipulação segura. Este procedimento visa preservar a integridade das amostras desde o momento da coleta. São selecionadas cuidadosamente folhas frescas e saudáveis diretamente das plantas de sisal. A escolha de folhas em boas condições é fundamental para assegurar que as amostras estejam livres de

contaminantes e mantenham suas características naturais. Os segmentos passam por um processo de lavagem para assegurar a remoção eficiente de impurezas superficiais e contaminantes potenciais. Em um béquer de 1 litro, os segmentos de folhas são submergidos em água destilada em quantidade suficiente para cobri-los completamente. Para manipulação segura e para evitar danos às amostras, uma pinça é utilizada para agitar suavemente os segmentos dentro do béquer. O processo de lavagem é repetido três vezes, com trocas de água fresca entre cada lavagem.

A lavagem contribui para preservar a integridade das amostras de sisal, mantendo suas propriedades naturais intactas para análises precisas e confiáveis. Após a lavagem inicial, os fragmentos são dispostos em uma camada única sobre uma bandeja de secagem forrada com papel toalha, permitindo que os pedaços de sisal sequem ao ar livre por aproximadamente 1 hora. Durante este período, o papel toalha absorve o excesso de água superficial, preparando as amostras para a subsequente secagem em estufa.

Figura 2: Processo de lavagem das folhas



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024

As amostras são transferidas para uma bandeja de plástico e colocadas em uma estufa de secagem pré-aquecida a uma temperatura de 60°C. Esta temperatura foi selecionada com base na capacidade de promover a evaporação gradual sem comprometer a estrutura das fibras. A amostra é deixada na estufa por um período de 24 horas.

Após o período de secagem na estufa, a bandeja de metal com as amostras é retirada e resfriada até atingir a temperatura ambiente. Para determinar a secagem, uma amostra representativa é selecionada e pesada com precisão utilizando uma balança semi-analítica. O peso da amostra é comparado com medições anteriores para avaliar a perda de umidade.

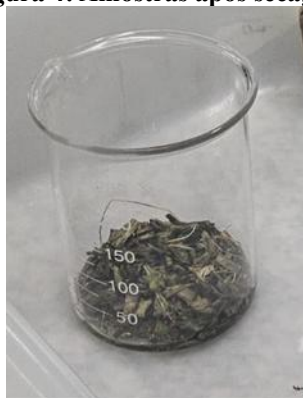
Figura 3: Pesagem após secagem



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024 Se for observada uma diferença significativa no

Peso da amostra, indicando presença de umidade residual, o processo de secagem é repetido em intervalos de 2 horas até que a variação de peso entre medições consecutivas seja insignificante (geralmente menos de 0,01 g). Este procedimento garante que as amostras de sisal atinjam um estado de secagem adequado para análises científicas, minimizando a introdução de variáveis.

Figura 4: Amostras após secagem



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024

Primeiramente, a cápsula de pesagem é colocada na balança analítica e calibrada para ajustar o zero. Em seguida, aproximadamente 10 gramas da amostra de sisal seca são cuidadosamente adicionados à cápsula.

Obtenção do Arabitól

Cultivo do bagaço do sisal em mesa agitadora

O processo de cultivo utilizando hidrolisado de bagaço de sisal em mesa agitadora (shaker) foi meticulosamente projetado para maximizar a produção de arabitól por meio da fermentação conduzida com a levedura *Debaryomyces hansenii*. Este experimento foi realizado em frascos Erlenmeyer de 1000 mL, contendo 400 mL de meio de cultivo especialmente preparado a partir do hidrolisado do bagaço de sisal.

O pH inicial do meio de cultivo foi ajustado para 6,5, um valor que proporciona um ambiente ligeiramente ácido, ideal para a proliferação de *D. hansenii*. Após o ajuste de pH, o precipitado indesejado foi removido por centrifugação. O meio foi então submetido a um processo de autoclavagem a 111 °C por 15 minutos para esterilização completa, eliminando qualquer possível contaminação microbiana.

Após a esterilização, a levedura *Debaryomyces hansenii* foi inoculada no meio a uma concentração de aproximadamente 10^7 células/mL. Esta levedura foi previamente cultivada em um pré-inóculo de 24 horas em condições similares, o cultivo foi realizado em mesa agitadora, mantendo uma temperatura constante de 30 °C e uma agitação controlada de 200 rpm, condições críticas para maximizar a taxa de transferência de oxigênio e promover um crescimento uniforme das células.

Figura 5: Utilização do agitador magnético



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2025

A fermentação foi monitorada em intervalos regulares de 12 horas, totalizando um período de 120 horas de observações. Essas medições são fundamentais para entender a dinâmica do metabolismo das leveduras e para otimizar as condições de fermentação visando o máximo rendimento de arabitól.

A etapa de purificação do arabitól foi iniciada, com foco na remoção de contaminantes solúveis para assegurar a alta pureza do produto final. Após a extração do arabitól, o sobrenadante foi cuidadosamente transferido para um bquer de 500 mL, onde foi adicionada uma quantidade precisa de 200 mL de água destilada. Este passo é crucial para induzir a precipitação de compostos indesejáveis, promovendo a formação de complexos insolúveis.

A solução contendo arabitol e água destilada foi então agitada suavemente para garantir uma mistura homogênea, permitindo uma interação completa entre os contaminantes solúveis e a água, o que favorece a sua precipitação. Após a agitação controlada, a solução foi deixada em repouso para que os precipitados se sedimentassem completamente. Este tempo de repouso é essencial, pois garante a separação eficiente dos contaminantes precipitados do arabitól solúvel.

Filtração

O processo foi realizado utilizando um filtro de papel de grau quantitativo ou uma membrana de porosidade definida, montado sobre um funil de vidro Borosilicato posicionado em um béquer estéril de 500 mL. A filtração foi conduzida sob condições controladas para maximizar a eficiência de separação das partículas sólidas e precipitados formados durante a etapa de clarificação.

Para otimizar a transferência e evitar a obstrução do filtro, um bastão de vidro previamente esterilizado foi empregado para auxiliar no direcionamento do fluxo da solução. Esse cuidado assegurou que todas as partículas indesejadas, como contaminantes precipitados e resíduos coloidais, fossem retidas pelo filtro, permitindo que apenas o filtrado clarificado contendo o arabitól purificado fosse coletado.

Figura 6: Amostras após filtragem



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024

Foi então preparada a etapa de concentração do arabitól, a qual envolve a remoção do solvente por técnicas de evaporação sob pressão reduzida, controlando a temperatura para minimizar perdas e degradações do bioproduto. O material filtrante contendo os contaminantes retidos foi descartado conforme protocolos rigorosos de descarte de resíduos laboratoriais, utilizando recipientes específicos para resíduos químicos e biológicos, assegurando que todos os procedimentos estivessem em conformidade com as regulamentações ambientais e normas de biossegurança.

Centrifugação

O procedimento de quantificação da biomassa celular inicia-se com a centrifugação das amostras, após a qual o sobrenadante é descartado e as células são lavadas com água destilada. Essa lavagem é crucial para remover resíduos solúveis e contaminantes, assegurando a pureza das células antes da quantificação. Após a lavagem, as células são secas em estufa a 105 °C por 24 horas, um processo que visa eliminar a umidade residual e estabilizar a massa seca das células. A análise de massa seca é realizada em quintuplicata para garantir a reprodutibilidade e precisão dos dados obtidos.

Esse processo de centrifugação permitiu a separação do sobrenadante enriquecido com arabitól, que permaneceu na parte superior dos tubos de ensaio.

A etapa de coleta do sobrenadante foi executada com extremo cuidado, transferindo o líquido para um béquer limpo e seco para garantir que o arabitól estivesse livre de impurezas. Essa precisão no manuseio é essencial para assegurar que o produto final mantenha altos níveis de pureza, uma vez que qualquer contaminação residual poderia interferir nos estudos subsequentes de caracterização e nas análises de suas propriedades bioquímicas.

Durante o processo experimental, a etapa de centrifugação desempenhou um papel crucial na purificação do arabitól extraído das fibras de sisal. Ao operar a 4000 rpm por um período otimizado de 15 minutos, a

centrifugação garantiu uma separação eficiente das partículas mais densas, como resíduos celulares e outros sedimentos, permitindo que o sobrenadante contendo o arabitol solúvel fosse isolado com alta pureza.

Figura 7: Centrífuga preparada para uso



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA

Esse controle preciso das condições operacionais não apenas assegurou a integridade do bioproduto, mas também minimizou a presença de impurezas, facilitando a análise subsequente de suas propriedades bioquímicas e o seu potencial de aplicação industrial. A eficiência do processo de purificação estabeleceu uma base sólida para futuras investigações científicas, destacando o arabitol derivado de sisal como um recurso biotecnológico promissor para usos em setores que buscam soluções sustentáveis e inovadoras, como nas indústrias farmacêuticas e químicas.

Secagem

Em seguida, a solução clarificada, que contém arabitol, é cuidadosamente transferida para um béquer de 250 mL, escolhido por sua capacidade adequada para conter a solução concentrada e facilitar o processo de evaporação subsequente. O béquer é colocado em um banho-maria previamente aquecido a uma temperatura controlada de 40 °C. Esta escolha é fundamental, pois o banho-maria fornece um aquecimento suave e uniforme, minimizando o risco de degradação térmica do arabitol, que é um composto sensível a altas temperaturas.

Concentração

A purificação de nutrientes é um processo fundamental em diversas áreas, especialmente na biotecnologia e na indústria alimentícia, onde a obtenção de compostos puros, como a inulina e o arabitol, é crucial para garantir a qualidade e a eficácia dos produtos finais. Para a realização desse procedimento, é necessário um conjunto específico de materiais e um método preciso para assegurar a remoção eficaz das impurezas presentes na solução inicial. Os materiais necessários incluem um béquer de 500 mL, que serve como recipiente para a solução concentrada de inulina e arabitol. Além disso, é indispensável o uso de um funil de filtração, que, juntamente com um filtro de papel ou uma membrana, permite a separação dos precipitados das impurezas solúveis. Um bastão de vidro é utilizado para agitar a solução de maneira controlada, enquanto solventes como etanol ou acetona são empregados para promover a precipitação das impurezas, facilitando sua posterior remoção.

O procedimento começa com a transferência da solução concentrada contendo inulina e arabitol para o béquer de 500 mL. Este passo inicial é essencial para garantir que todo o volume da solução a ser purificada esteja contido em um único recipiente, o que facilita o manuseio e a homogeneização durante o processo subsequente. Em seguida, é adicionado um solvente adequado à solução. A escolha do solvente, que pode ser etanol ou acetona, é baseada na sua capacidade de precipitar impurezas solúveis sem comprometer a integridade dos nutrientes desejados. Esta etapa deve ser realizada com cuidado, adicionando o solvente de forma gradual para evitar uma precipitação abrupta, que pode dificultar a separação eficiente das impurezas.

Após a adição do solvente, a solução deve ser misturada suavemente com o bastão de vidro. Esta agitação é crucial para garantir a distribuição uniforme do solvente em toda a solução, promovendo uma precipitação eficiente das impurezas. A agitação deve ser contínua e controlada até que a formação de precipitados seja visível, indicando que as impurezas começaram a se separar da solução. Com os precipitados formados, a solução precisa ser filtrada. Para isso, um funil de filtração é utilizado, e um filtro de papel ou membrana é inserido no funil. A solução é então vertida lentamente sobre o filtro, permitindo que o líquido passe através do material filtrante enquanto os precipitados ficam retidos. Este processo de filtração deve ser realizado com atenção para evitar o entupimento do filtro e para assegurar que todas as impurezas precipitadas sejam removidas da solução. O

resultado desse procedimento é uma solução purificada de inulina e arabitol, livre das impurezas que possam comprometer suas propriedades e aplicações.

Figura 8: Amostras concentrada



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024

Concentração de nutrientes em análise de curvas

A leitura da densidade óptica da amostra foi realizada utilizando um espectrofotômetro, com um comprimento de onda de 600 nm, a cada 12 horas durante o cultivo. As amostras coletadas foram diluídas conforme necessário e, após homogeneização, a suspensão obtida foi submetida à análise espectrofotométrica. Ao final do cultivo, foram preparadas diversas diluições (1:1, 1:2, 1:5, 1:10, 1:15 e 1:20 mL) para a construção da curva de calibração, conforme descrito por Ishmayana et al. (2015).

Os parâmetros de fermentação foram calculados, incluindo o rendimento teórico de conversão de substrato em produto (YP/S), a produtividade volumétrica (QP), a velocidade volumétrica de consumo de substrato (rs) e a porcentagem de consumo do substrato (Y%). O rendimento teórico de conversão de substrato em produto (YP/S) é definido pela relação entre a concentração final (Pf) e inicial (Pi) do produto, em função das concentrações inicial (Si) e final (Sf) do substrato, utilizando a seguinte equação:

$YP/S = (Sf - Si) / (Pf - Pi)$ (g/g) Em que:

YP/S – Fator de conversão de açúcares em álcoois (g produto formado/g substrato consumida g/g)

Pf e Pi – Concentração final e inicial de produto (g/L)

Sf e Si – Concentração final e inicial de substrato (g/L)

Além disso, a porcentagem de consumo do substrato (Y%) representa o valor do açúcar (xilose e arabinose) convertido em produto (xilitol e arabitol) e é calculada conforme a equação:

$Y(\%) = [(Si - Sf) / Si] \times 100 (\%)$

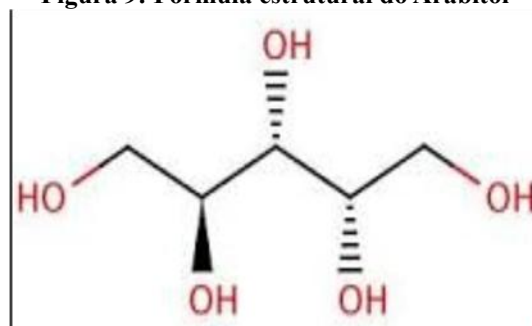
Após a purificação inicial, o procedimento de concentração começa com a transferência da solução filtrada, contendo os nutrientes inulina e arabitol, para um béquer de 250 mL. Esse passo inicial garante que a solução esteja em um recipiente adequado para o processo subsequente de aquecimento, e deve ser realizado com cuidado para evitar a introdução de contaminantes que possam interferir no processo de concentração.

O béquer contendo a solução é então colocado em um banho-maria pré-aquecido a uma temperatura controlada de 40°C. O banho-maria proporciona um aquecimento suave e uniforme, essencial para evitar a degradação dos nutrientes durante o processo de evaporação. A escolha da temperatura de 40°C é estratégica, pois é suficientemente baixa para preservar as propriedades dos compostos, enquanto é eficaz para promover a evaporação do solvente presente na solução.

A solução é deixada no banho-maria por um período de uma hora, durante o qual a temperatura controlada permite uma evaporação gradual do solvente. Esse processo resulta na concentração dos nutrientes inulina e arabitol na fase líquida remanescente. A evaporação parcial é crucial, pois remove uma parte significativa do solvente, aumentando a concentração dos compostos desejados sem a necessidade de um aquecimento excessivo que poderia levar à decomposição dos nutrientes.

Ao término do período de aquecimento, a solução concentrada deve ser cuidadosamente removida do banho-maria e deixada esfriar à temperatura ambiente. O resultado é uma solução com maior concentração de inulina e arabitol, tornando-a adequada para usos subsequentes onde se busca uma maior concentração desses nutrientes. A imagem a seguir ilustra os resíduos remanescentes da filtração em um filtro de papel, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso durante as etapas de purificação.

Figura 9: Fórmula estrutural do Arabitol



Fonte: L-(-)-Arabitol | CAS 7643-75-6 , Santa Cruz

Ao término do período de aquecimento, a solução concentrada deve ser cuidadosamente removida do banho-maria e deixada esfriar à temperatura ambiente. O resultado é uma solução com maior concentração de inulina e arabitol, tornando-a adequada para usos subsequentes onde se busca uma maior concentração desses nutrientes. A imagem a seguir ilustra os resíduos remanescentes da filtração em um filtro de papel, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso durante as etapas de purificação.

Extração da Inulina

Filtração

Após a extração, a solução que contém inulina deve passar por um processo de filtração para remover resíduos insolúveis, resultantes da degradação ou fragmentação das fibras vegetais do caule. Devido à alta viscosidade da solução, a filtração a vácuo é o método preferido, proporcionando uma taxa de fluxo superior e minimizando o risco de obstrução do meio filtrante.

O sistema de filtração a vácuo consiste em um funil de Büchner acoplado a uma bomba de vácuo, permitindo a criação de uma pressão negativa que acelera a passagem do solvente através do papel de filtro. Para a filtração, é utilizado um papel de filtro de porosidade média (aproximadamente 25 µm), que retém partículas de grande porte, como fragmentos de fibras e sedimentos, enquanto permite a passagem de soluções contendo açúcares, como a inulina.

Durante a filtração, a pressão de vácuo é ajustada para aproximadamente 500 mmHg. O controle rigoroso da pressão é crucial para assegurar que o solvente flua eficientemente pelo filtro, evitando a retenção indesejada de inulina na camada de material residual. A viscosidade da solução é uma função direta da concentração de inulina, e o monitoramento constante é necessário para prevenir a formação de um "cake" que pode obstruir o filtro e comprometer a eficiência da filtração.

Concluída a filtração, a solução clarificada, agora livre de sólidos insolúveis, é coletada em um frasco de vácuo. Esta solução é então direcionada para a etapa subsequente de centrifugação, onde a inulina e outros açúcares serão separados e concentrados. A centrifugação, realizada a uma velocidade de 10.000 rpm por um período de 10 minutos, permite a sedimentação das células e partículas restantes, garantindo que a fração líquida seja adequada para análises subsequentes, como espectrofotometria, que permitirá a quantificação da inulina com base na densidade óptica.

Figura 10: Processo de filtração



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS e SILVA, 2025

Determinação dos açúcares

A determinação dos açúcares, especialmente da inulina, é uma etapa fundamental na análise qualitativa e quantitativa de extratos obtidos de fibras vegetais. A inulina, um frutano que consiste em cadeias de frutose ligadas por ligações glicosídicas $\beta(2\rightarrow1)$, é de particular interesse devido às suas propriedades funcionais e aplicações em setores alimentícios e farmacêuticos. Portanto, a identificação e quantificação precisas de inulina são essenciais para avaliar a eficácia do processo de extração e suas potenciais aplicações.

Determinação de açúcares totais

A determinação de açúcares totais é uma análise crítica para a caracterização de extratos vegetais, especialmente aqueles derivados de fontes como o sisal, que contém inulina. Os açúcares totais incluem tanto monossacarídeos, como glicose e frutose, quanto oligossacarídeos e polissacarídeos, como inulina e frutooligosacarídeos (FOS). A quantificação desses compostos não apenas fornece uma visão abrangente da composição do extrato, mas também informa sobre suas propriedades funcionais, como solubilidade, capacidade de retenção de água e potencial prebiótico.

Para a quantificação de açúcares totais, seguimos um protocolo baseado em espectrofotometria, conforme descrito na literatura. A metodologia começa com a construção de uma curva padrão utilizando soluções de açúcares conhecidos, que serve como referência para a quantificação das amostras testadas. A curva foi gerada utilizando concentrações de glicose, um monossacarídeo comumente utilizado como padrão devido à sua disponibilidade e solubilidade.

Após a extração e purificação da solução de inulina, as amostras foram tratadas de acordo com a metodologia estabelecida. Cada amostra foi submetida a leituras espectrofotométricas em triplicata a um comprimento de onda de 490 nm, o que é eficaz para a detecção de compostos açucarados devido à sua absorbância característica. Os valores médios de absorbância obtidos foram de 0,012 para 40°C, 0,012 para 60°C e 0,017 para 90°C.

Utilizando a equação da curva padrão, que relaciona a absorbância à concentração de açúcares totais, e considerando uma diluição de 50 vezes das amostras, foi possível calcular as concentrações de açúcares totais nas amostras extraídas sob diferentes condições térmicas, conforme apresentado na Tabela 4. A análise dos resultados revelou que as extrações realizadas a 40°C e 60°C não apresentaram diferenças estatisticamente significativas na concentração de açúcares totais. Essa observação sugere que, dentro desse intervalo de temperatura, a solubilidade da inulina não foi afetada de forma relevante, permitindo uma extração eficiente e consistente dos açúcares presentes.

Além disso, a metodologia utilizada assegura que os açúcares livres sejam quantificados com precisão, evitando interferências que poderiam surgir devido à presença de sólidos insolúveis. A filtração a vácuo foi escolhida para a separação dos resíduos sólidos após a extração, utilizando um funil de Büchner acoplado a uma bomba de vácuo. O papel de filtro com porosidade média (~25 μm) foi selecionado para reter partículas indesejadas sem obstruir o fluxo do solvente, garantindo a integridade da solução filtrada.

Determinação de açúcares redutores

A quantificação de açúcares redutores é fundamental para avaliar a presença de açúcares que possuem grupos carbonila livres, os quais são capazes de reduzir agentes químicos, como no caso do reagente de DNS (dinitrosalicílico). Estes açúcares incluem, mas não se limitam a, glicose, frutose e outros monossacarídeos, bem como oligossacarídeos que podem liberar açúcares redutores em condições ácidas ou por meio de hidrólise.

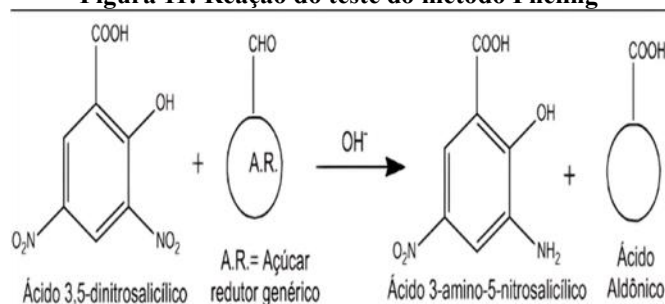
Para a determinação de açúcares redutores, uma curva padrão foi construída segundo a metodologia estabelecida, utilizando soluções padrão de glicose. Esta curva serve como referência para a quantificação dos açúcares redutores presentes nas amostras. A leitura das amostras foi realizada em triplicata a um comprimento de onda de 540 nm, apropriado para a detecção dos produtos formados pela reação entre os açúcares redutores e o reagente de DNS.

Esta abordagem permite calcular a concentração de inulina a partir das medições de açúcares totais, açúcares redutores e sacarose, previamente obtidas através de análises espectrofotométricas. O cálculo é fundamental, pois a inulina, um polímero de frutose, é um componente importante das raízes de várias plantas, exercendo funções significativas tanto no metabolismo vegetal quanto em aplicações industriais e nutricionais.

$$\text{Porcentagem de Inulina} = (\text{Concentração de Inulina} / 10\text{g}) \times 10$$

Teste Final: Fenol e Ácido Sulfúrico

O fenol é um composto aromático que contém um grupo hidroxila ($-\text{OH}$) ligado ao anel benzênico, conferindo-lhe características reativas. O ácido sulfúrico, por sua vez, é um ácido forte com propriedades desidratantes e oxidantes, atuando como um potente agente sulfonante.

Figura 11: Reação do teste do método Fehling

Fonte: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019

Os resultados indicam que a temperatura de extração tem um impacto significativo na liberação de açúcares redutores. Por exemplo, a amostra extraída a 90°C apresentou a maior absorbância, sugerindo uma maior concentração de açúcares redutores em comparação com as amostras extraídas a temperaturas mais baixas.

Determinação de açúcares não redutores

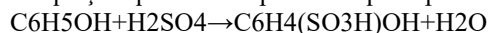
A determinação da concentração de sacarose em amostras vegetais é realizada indiretamente por meio da análise de açúcares redutores, utilizando um método que envolve o tratamento das amostras com uma solução de invertase e um tampão acetato de sódio a pH 4,5. A invertase promove a hidrólise da sacarose em glicose e frutose, permitindo calcular a quantidade de sacarose como a diferença entre as concentrações totais de açúcares redutores antes e após o tratamento.

Determinação da Inulina

A determinação da inulina em amostras vegetais pode ser realizada utilizando a seguinte equação:

No processo, o fenol é colocado em um reator, e o ácido sulfúrico concentrado é adicionado cuidadosamente ao fenol. Durante essa etapa, o ácido sulfúrico promove a protonação do oxigênio no grupo hidroxila do fenol, tornando o anel aromático mais reativo para a substituição eletrofílica. A consequência dessa interação é a formação do ácido fenolsulfônico ($\text{C}_6\text{H}_4(\text{SO}_3\text{H})\text{OH}$), junto com a liberação de água ($\text{H}_2\text{OH}_2\text{O}$) como subproduto.

A equação química simplificada que representa essa reação é a seguinte:



Durante a reação, podem ser observados fenômenos macroscópicos significativos. A solução pode mudar de cor, indicando a formação do novo composto, e a reação, sendo exotérmica, libera calor. reduzido a cerca de 50% do original.

Figura 12: Amostra antes e após o teste de Fenol.

Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2025.

Concentração da solução

O filtrado é transferido para um evaporador rotativo. Este equipamento é projetado para remover o solvente (etanol) sem causar a degradação térmica da inulina. O evaporador rotativo é operado a uma temperatura de 45°C e pressão de 80 mbar, evaporando o etanol de maneira controlada. A evaporação dura cerca de 1 hora,

durante a qual o volume da solução diminui significativamente, resultando em uma concentração de inulina em sua fase aquosa.

Purificação de nutrientes

A purificação de nutrientes, como inulina e arabi- tol, é um processo essencial para remover impurezas e compostos indesejados. Este processo começa com a utilização de uma coluna de cromatografia em leito fixo, onde a solução bruta, previamente extraída e filtrada, é introduzida. A escolha da fase móvel é crucial; frequentemente, uma solução tampão com pH controlado é utilizada para garantir que os compostos permaneçam em sua forma solúvel. A temperatura da coluna deve ser mantida em 25°C para evitar a degradação térmica dos nutrientes.

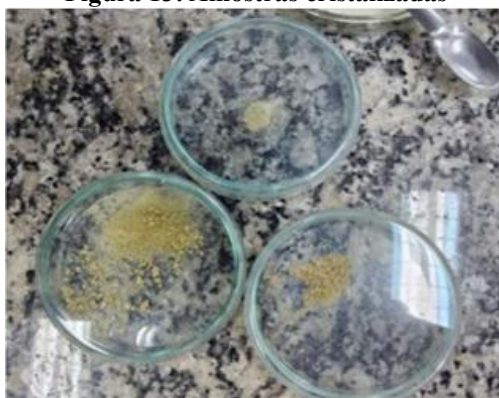
Concentração de nutrientes

Seguidamente à purificação, a concentração de inulina e arabitól é realizada por evaporação controlada. A solução filtrada é transferida para um evaporador rotativo ajustado a uma temperatura de 40°C, com pressão reduzida (cerca de 100 mmHg). O processo de evaporação é monitorado continuamente, e a perda de volume é registrada em intervalos de 15 minutos. A concentração desejada é geralmente atingida quando o volume inicial é

Cristalização do açúcar

O ambiente de cristalização deve ser controlado para manter uma temperatura de cerca de 30°C, com um nível de umidade relativa ajustado para cerca de 50%, favorecendo a formação de cristais de inulina.

Figura 13: Amostras cristalizadas



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024.

Após a transferência, a solução é deixada em repouso por até 72 horas. A formação de cristais ocorre através da nucleação e crescimento, onde moléculas de inulina se organizam em uma estrutura ordenada. Após o período de cristalização, os cristais são retirados, secos em uma estufa a 40°C e pesados para quantificar a pureza e o rendimento do processo.

Ajuste de pH

O ajuste de pH é uma etapa crítica para preparar a solução concentrada de arabitól para as análises subsequentes. Inicialmente, a solução concentrada é transferida para um recipiente adequado e o pH é medido utilizando um pHmetro calibrado.

Este equipamento é essencial para determinar o valor inicial do pH da solução. Para atingir um pH de 7.0, gotas de ácido clorídrico diluído são adicionadas gradualmente à solução sob agitação suave. O ácido clorídrico ajuda a neutralizar a solução, ajustando o pH para o ponto desejado caso a solução esteja excessivamente alcalina; caso o inverso ocorra, o Bicarbonato de Sódio pode ser utilizado. Durante este processo, uma solução tampão pode ser usada para manter o pH estável e prevenir variações indesejadas.

Figura 14: Utilização do pHmetro



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA

Secagem final

A solução é transferida para uma cápsula de porcelana. Esta cápsula é então colocada em uma estufa pré-aquecida a 40°C. A secagem é realizada por um período de 6 horas, durante o qual toda a umidade residual e resíduos de solvente são removidos completamente.

Calcinação

A calcinação é uma etapa essencial para eliminar quaisquer resíduos inorgânicos que possam estar presentes na amostra de arabitol após a secagem final. A cápsula de porcelana contendo a amostra é transferida para uma mufla, onde é exposta a uma temperatura de 200°C por um período de 1 hora. Esta alta temperatura promove a decomposição e a queima de qualquer material inorgânico residual, resultando em uma amostra de arabitol purificada.

Espectrofotometria

Para análise quantitativa e verificação da pureza do arabitol purificado, uma pequena quantidade da amostra é dissolvida em 5 mL de água destilada. Esta solução é então transferida para uma cubeta de quartzo, ideal para análises espectrofotométricas devido à sua transparência e baixa interferência com a luz.

Figura 15: Utilização do espectômetro



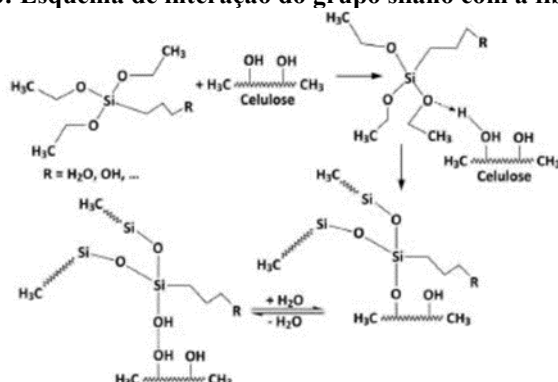
Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA

O espectrofotômetro é configurado para medir a absorção da solução na faixa de comprimento de onda de 400 a 700 nm. Os espectros de absorção obtidos são registrados e comparados com padrões conhecidos de arabitol. Essa comparação permite não apenas a quantificação precisa do arabitol na amostra, mas também a verificação da sua pureza após as etapas de purificação.

Mercerização da fibra para obtenção dos açúcares

O processo de mercerização do sisal é uma etapa crucial na transformação das fibras naturais em produtos mais refinados e úteis, como o açúcar mencionado. Inicialmente, as fibras de sisal são tratadas com uma solução alcalina, tipicamente hidróxido de sódio, a uma concentração de cerca de 20%. Este tratamento ocorre geralmente em temperaturas em torno de 50°C e pode durar entre uma a três horas, dependendo do grau de mercerização desejado. Durante este processo, a estrutura cristalina da celulose presente nas fibras de sisal é alterada de forma irreversível, passando de celulose I para celulose II, o que resulta em um aumento da área superficial e da reatividade química das fibras.

Figura 16: Esquema de interação do grupo silano com a fibra natural



Fonte: ALBINANTE, Sandra Beatriz; PACHECO, Élen ; VISCONTE, Leila Lea, Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas, Química Nova, v. 36, n. 1, p. 114–122, 2013.

Geralmente, soluções aquosas de hidróxido de sódio (NaOH) são empregadas para a mercerização e extração de fibras de sisal, devido à sua capacidade de promover mudanças estruturais significativas nas fibras celulósicas. A concentração de NaOH utilizada pode variar, mas estudos indicam que uma concentração de aproximadamente 2% em peso por peso (p/p) tende a maximizar a resistência térmica das fibras tratadas, enquanto mantém um bom índice de cristalinidade.

Além do NaOH, outras soluções alcalinas podem ser utilizadas, como o hidróxido de potássio (KOH), embora seja menos comum. A escolha entre NaOH e KOH pode depender de fatores como custo, disponibilidade e objetivos específicos do tratamento. Por exemplo, o KOH pode ser preferido em casos onde se deseja uma modificação mais suave da fibra, enquanto o NaOH é escolhido para modificações mais intensas na estrutura da fibra.

A mercerização não só altera a estrutura cristalina das fibras de sisal, mas também remove impurezas e ceras naturais presentes na superfície, o que melhora a adesão das fibras em compósitos e aumenta a uniformidade. É importante mencionar que o processo de mercerização deve ser conduzido com cuidado, seguindo protocolos de segurança rigorosos, especialmente devido à natureza corrosiva do NaOH. No contexto da produção de açúcar a partir do arabitol e da inulina presentes no sisal, a mercerização pode ser um passo preliminar para aumentar a eficiência da hidrólise subsequente, facilitando assim a liberação dos açúcares necessários para a fermentação. Este processo integrado, que combina o tratamento químico das fibras com a conversão bioquímica dos açúcares, representa uma abordagem sustentável e inovadora para a valorização de recursos naturais como o sisal.

Floculação

A floculação é um processo químico e físico fundamental no tratamento de água, que envolve a adição de substâncias coagulantes para promover a aglomeração de partículas coloidais. Estas partículas, devido ao seu tamanho microscópico, não se sedimentam naturalmente e não podem ser removidas por filtração convencional.

Uma substância química conhecida como "floculante" é introduzida na água. O uso de coagulantes, como o sulfato de alumínio ou o cloreto férrico, induz uma série de reações químicas que resultam na formação de flocos. Estes flocos decantam no fundo dos tanques de tratamento, facilitando a remoção das impurezas por sedimentação.

Concentração

O caldo clarificado, resultado do processo de sedimentação, é então submetido à etapa de concentração visando o aumento da concentração de açúcares. Após a concentração, a recristalização é conduzida para purificar ainda mais o açúcar. Nesta etapa, os cristais de açúcar são cuidadosamente formados em condições controladas para garantir a pureza do produto final. Ao combinar a concentração e a recristalização, é possível obter um açúcar de alta qualidade, livre de impurezas e com características desejáveis.

A recristalização é um processo refinado que visa purificar substâncias cristalinas, como o açúcar, removendo impurezas. No contexto da produção de açúcar, a recristalização é uma etapa crítica para garantir a qualidade e a pureza do produto final. O processo começa com a dissolução do açúcar bruto em água quente para formar uma solução saturada. A temperatura e a concentração são cuidadosamente controladas para assegurar que a solução atinja o ponto de supersaturação sem precipitar a cristalização prematura. Uma vez atingida a supersaturação, inicia-se o processo de sementeamento, onde pequenos cristais de açúcar, conhecidos como 'sementes', são adicionados à solução. Essas sementes servem como núcleos para o crescimento de novos cristais. A solução é então resfriada lentamente, permitindo que os cristais de açúcar cresçam em torno das sementes.

Durante esse estágio, é crucial manter a solução agitada para promover um crescimento uniforme dos cristais e evitar a aglomeração.

A medida que os cristais crescem, as impurezas são excluídas da estrutura cristalina e permanecem na solução mãe. Após um período determinado, quando os cristais atingem o tamanho desejado, a mistura é submetida a um processo de centrifugação. O controle de qualidade durante a recristalização é vital.

Experimentação

Para os ensaios antimicrobianos *in vitro*, serão necessárias placas de Petri, meios de cultura específicos para bactérias orais, pipetas automáticas, e um leitor de microplacas para quantificar o crescimento bacteriano.

Na avaliação do efeito sobre o tecido adiposo, serão utilizadas incubadoras de CO₂ para manter as culturas celulares de adipócitos, microscópios de fluorescência para visualizar a diferenciação celular, e kits de ensaio para medir marcadores de lipólise e adipogênese. Os experimentos *in vivo* exigirão uma instalação de biotério com controle ambiental, gaiolas e dietas específicas para os animais, além de equipamentos para monitoramento metabólico, como calorímetros indiretos e analisadores de composição corporal.

III. Resultados E Discussão

Monitoramento de pH

Durante o processo de ajuste do pH com ácido clorídrico, é vital verificar o pH frequentemente. Utilizando um pHmetro calibrado, o pH da solução deve ser medido após cada adição de ácido e durante a agitação. Caso o pH permaneça acima de 7,0, ajustes adicionais com ácido clorídrico podem ser necessários. Portanto, a precisão e a atenção constante durante todo o processo de ajuste do pH são essenciais para garantir a qualidade e a eficácia do açúcar de sisal produzido. Após a adição dos reagentes, a medição do pH final é uma etapa crucial no processo de ajuste, realizada com um pHmetro calibrado para garantir precisão.

Figura 17: Tira universal de potencial de hidrogênio (pH) ácido



Fonte: Elaborado por ELOY, LINS E SILVA, 2024

Se o pH ainda estiver abaixo de 6,0 após a adição de bicarbonato, ajustes adicionais podem ser necessários. Caso o pH ultrapasse 7,0, a situação deve ser cuidadosamente avaliada, pois um pH muito alto pode também ser prejudicial à qualidade do açúcar de sisal. Portanto, o monitoramento constante e a abordagem metódica durante o processo de ajuste do pH são essenciais para garantir um produto final de alta qualidade. O monitoramento cuidadoso do pH é essencial, pois mesmo pequenas variações podem impactar a cristalização e a estabilidade dos compostos, como a sacarose, inulina e arabitol presentes na solução.

Caso a medição indique que o pH ainda não se encontra dentro da faixa ideal, ajustes adicionais podem ser realizados. A adição de bicarbonato de sódio ou ácido clorídrico deve ser feita com cautela e de forma gradual. Essa prática é fundamental para evitar oscilações drásticas de pH, que poderiam levar a um estresse químico significativo nos compostos presentes na solução.

Oscilações abruptas podem resultar em reações indesejadas, como a degradação dos açúcares ou a formação de subprodutos que possam comprometer a qualidade final do açúcar de sisal.

O processo de ajuste de pH em soluções de açúcar de sisal envolve a utilização de substâncias que reagem com os íons presentes na solução, promovendo uma correção do pH para o nível desejado. As duas situações mais comuns são o aumento do pH em soluções excessivamente ácidas e a diminuição do pH em soluções excessivamente básicas.

Comparação entre açúcares

O açúcar de sisal, com sua composição predominante de arabitol e inulina, consiste em uma alternativa promissora, especialmente em comparação com açúcares mais tradicionais, como a sacarose, o açúcar mascavo, o açúcar demerara e o açúcar de coco. A sacarose, o açúcar de mesa mais comum, é um dissacarídeo composto por uma molécula de glicose e uma de frutose, com a fórmula química C₁₂H₂₂O₁₁.

Este açúcar é extraído principalmente da cana-de-açúcar e da beterraba. Quando consumido, a sacarose é rapidamente metabolizada pelo organismo, levando a um aumento rápido e significativo dos níveis de glicose no sangue, o que resulta em um alto índice glicêmico.

Esse aumento abrupto pode promover a resistência à insulina ao longo do tempo, contribuindo para distúrbios metabólicos como diabetes tipo 2. Além disso, a sacarose é facilmente fermentada pelas bactérias presentes na cavidade bucal, resultando na produção de ácidos que corroem o esmalte dos dentes, aumentando o risco de cáries dentárias.

Portanto, o consumo excessivo de açúcar de mesa é associado a vários problemas de saúde, incluindo obesidade, doenças cardiovasculares e cáries. O açúcar de sisal, derivado das folhas e do caule da planta de sisal, é uma inovação no campo dos adoçantes naturais, caracterizado pela predominância de arabitol e inulina. Abaixo estão as principais características desse açúcar.

Figura 18: Tabela Nutricional Do Açúcar Demerara



AÇÚCAR DEMERARA		
INFORMAÇÃO NUTRICIONAL		
Porção de 5g (1 colher de chá)		
Quantidade por Porção		%VD (*)
Valor Energético	20 kcal	1%
Carboidratos	5g	1,7%
Proteínas	0g	0%
Gorduras Totais	0g	0%
Gorduras Saturadas	0g	0%
Gorduras Trans	0g	**
Fibra Alimentar	0g	0%
Sódio	0mg	0%

(*) % Valores diários de referência com base em uma dieta de 2000kcal ou 8400kJ. Seus valores podem ser maiores ou menores dependendo de suas necessidades energéticas. NÃO CONTEM GLUTEN.

Fonte: Armazém Sabores E Granel. Açúcar Demerara.

Tabela 3: Comparação Entre Açúcares

Tipo de Açúcar	Composição Química	Fonte	Uso	Impacto na Saúde	Propriedades Funcionais	Benefícios Adicionais
Açúcar de Mesa (Sacarose)	Sacarose (C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁), um dissacarídeo composto por glicose (C ₆ H ₁₂ O ₆) e frutose (C ₆ H ₁₂ O ₆) ligados por uma ligação glicosídica α-1,2.	Cana-de-açúcar (Saccharum officinarum), beterraba (Beta vulgaris)	Amplamente utilizado em produtos alimentícios e bebidas como adoçante e agente de conservação.	Sacarose possui um índice glicêmico (IG) entre 60-65, causando rápida liberação de insulina e picos glicêmicos no sangue; seu metabolismo excessivo pode levar à lipogênese e à resistência à insulina, favorecendo o risco de diabetes tipo 2, obesidade, doenças cardiovasculares e	Promove a rápida liberação de energia através da glicólise e do ciclo de Krebs; potencializa o sabor doce em produtos alimentares e aumenta a palatabilidade.	Rápida disponibilização de energia para atividades físicas de curta duração; no entanto, o consumo excessivo pode aumentar os níveis de triglicéridos e contribuir para a adipogênese e o acúmulo de gordura visceral.
Açúcar Mascavo	Sacarose parcialmente refinada com traços de melão e presença significativa de minerais (potássio, cálcio, magnésio, ferro e compostos fenólicos).	Cana-de-açúcar	Utilizado em alimentos integrais, receitas caseiras e produtos artesanais, onde sabor e umidade são desejáveis.	Índice glicêmico similar ao açúcar branco (IG 65), mas menos processado; contém micronutrientes que, embora presentes em pequenas quantidades, possuem funções antioxidantes e podem reduzir o estresse oxidativo celular; ainda assim, pode induzir à formação de cáries e desequilíbrio metabólico quando consumido em excesso.	Contém propriedades antioxidantes moderadas devido à presença de compostos fenólicos provenientes do melão; favorece a retenção de umidade em produtos alimentícios assados, melhorando sua textura e durabilidade.	Oferece benefícios mínimos adicionais sobre o açúcar branco devido à preservação do melão, que pode ter efeitos positivos na saúde digestiva e no metabolismo mineral.
Açúcar Demerara	Sacarose com resíduos de melão, apresentando uma menor refinaria, o que mantém uma fração significativa de compostos fenólicos e minerais.	Cana-de-açúcar	Usado em bebidas, chás, cafés e confeitaria para adicionar sabor e textura caramelizada.	Menos processado que o açúcar branco, possui um IG próximo a 60-65; apesar da redução no processamento, os efeitos metabólicos são semelhantes aos da sacarose pura, com riscos semelhantes para saúde bucal e possíveis contribuições ao aumento da resistência à insulina em casos de consumo crônico.	Textura granulada e sabor levemente caramelizado que adiciona valor sensorial a produtos culinários; possui propriedades hipoglicêmicas que ajudam na manutenção da umidade de alimentos.	Pode proporcionar uma vantagem marginal em termos de conteúdo nutricional sobre o açúcar branco devido ao leve residual de melão, incluindo traços de potássio, cálcio e antioxidantes.
Açúcar de Coco	Composto por frutose, glicose e inulina (um polímero de frutose com ligações β-2,1) que atua como fibra solúvel.	Seiva extraída das flores do coqueiro (Cocos nucifera)	Utilizado como substituto natural ao açúcar refinado em alimentos, bebidas e produtos de confeitaria.	Apresenta um baixo índice glicêmico (IG 35), o que reduz as flutuações bruscas nos níveis de glicose no sangue e contribui para a manutenção de níveis glicêmicos estáveis; contém vitaminas do complexo B e minerais essenciais como ferro, zinco, cálcio e potássio, que ajudam no metabolismo celular e	Alto teor de fibras solúveis (inulina) que promovem efeito prebiótico, estimulando o crescimento de bactérias benéficas no intestino, como Bifidobactérias e Lactobacilos.	Ajuda a melhorar a saúde intestinal e a resposta imunológica; contribui para maior saciedade e controle do apetite devido à digestão lenta e absorção prolongada de glicose, podendo auxiliar na gestão do peso corporal.

Açúcar de Sisal	Arabitol (um poliol com baixo valor calórico) e inulina (fibra solúvel), ambos extraídos das folhas e do caule do sisal (Agave sisalana), além de conter alto teor de fibras alimentares	Derivado das folhas e caule do sisal	Proposto como uma alternativa saudável ao açúcar refinado em produtos alimentícios e farmacêuticos	Baixíssimo índice glicêmico (IG 15), reduz o risco de hiperglicemia e promove efeitos benéficos para a saúde bucal ao inibir a formação de placa bacteriana; o arabitol possui propriedades anticariogênicas e antioxidantes, enquanto a inulina age como prebiótico, modulando a microbiota intestinal e potencializando a absorção de cálcio e magnésio.	O arabitol possui propriedades higroscópicas e baixa fermentação no trato digestivo, o que reduz sintomas gastrointestinais; a inulina atua na melhora da saúde intestinal ao promover o crescimento de bactérias probióticas.	Potencial para reduzir os níveis de colesterol LDL e melhorar a saúde cardiovascular; pode favorecer a perda de peso ao aumentar a saciedade e reduzir a absorção de calorias; representa um avanço na inovação de adoçantes naturais de baixa caloria para uso em produtos alimentícios e terapêuticos.
------------------------	--	--------------------------------------	--	--	--	--

Fonte: Elaborado Por ELOY, LINS E SILVA, 2024

Segurança no manuseio

O ácido clorídrico é corrosivo e deve ser manuseado com cautela. O uso de equipamentos de proteção individual (EPI), como luvas, óculos de proteção e aventais, é imprescindível durante todo o processo de ajuste.

Aspectos benéficos da inulina

A Inulina é classificada como fibra dietética e prebiótica, o que significa que ela estimula o crescimento de bactérias benéficas no intestino. Estudos têm demonstrado que ela pode ajudar na regulação do peso, melhoria da função intestinal e até mesmo na redução do risco de certas doenças crônicas. Os fruto-oligossacarídeos presentes na inulina conferem um sabor doce, o que pode melhorar a palatabilidade de produtos alimentícios sem adicionar calorias extras. No cólon, a inulina é fermentada por bactérias benéficas como bifidobactérias e lactobacilos. Esse processo de fermentação quebra a inulina em ácidos graxos de cadeia curta (AGCCs), como acetato, propionato e butirato.

Os AGCCs, especialmente o propionato e o butirato, são absorvidos pela circulação sistêmica e exercem efeitos diretos no tecido adiposo. Eles atuam como ligantes para receptores específicos, como o receptor de ácidos graxos GPR43. A ativação desses receptores promove a oxidação de ácidos graxos e a termogênese, processos que aumentam a queima de gordura e ajudam a reduzir a adiposidade.

Esses AGCCs são importantes moléculas que desempenham papéis na modulação do metabolismo e ácidos. Esses compostos incluem não apenas AGCCs, mas também outros metabólitos que melhoram a barreira intestinal, reduzem a inflamação e influenciam o metabolismo energético em tecidos periféricos, incluindo o adiposo. Esse equilíbrio microbiano saudável origina uma menor acumulação de gordura visceral e de risco associados à obesidade e ao diabetes tipo 2.

Aspectos benéficos do arabitol

O arabitol é metabolizado de forma limitada pelas bactérias bucais patogênicas, como *Streptococcus mutans*, responsáveis pela formação de cáries dentárias. Essas bactérias fermentam açúcares comuns, como a glicose e a frutose, produzindo ácidos que desmineralizam o esmalte dos dentes. No entanto, o arabitol não é facilmente fermentado por estas bactérias, desacelerando a formação de biofilmes, agregados de bactérias que se formam na superfície.

Sua principal característica é a não fermentação por bactérias orais, que resulta na inibição da produção de ácidos. A fermentação, que ocorre em resposta à metabolização de açúcares pelas bactérias presentes na boca, leva à acidificação do ambiente, um dos principais fatores responsáveis pela desmineralização do esmalte dentário. Logo, o arabitol atua como um agente protetor, ao evitar essa acidificação e, consequentemente, reduzindo o risco de cáries. A reação de desmineralização, causada pela acidificação do ambiente, pode ser descrita pela seguinte equação química:

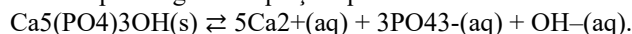


Figura 19: Processo de desmineralização dentária



Fonte: VELOSO, Ana. Desmineralização e Mineralização, Solubilidade, pH e cárie dentária

Nesta equação, a hidroxiapatite (um composto cristalino que confere dureza e resistência ao esmalte) se decompõe em íons de cálcio, fosfato e hidróxido, que se dispersam na saliva. A mineralização é crucial, pois permite a reposição dos minerais perdidos.

IV. Considerações Finais

Desta forma, conclui-se, com base no embasamento teórico, que o uso do Arabitol e da Inulina é benéfico e eficiente tanto na administração do tecido adiposo humano quanto na promoção da saúde bucal. A partir dos estudos e pesquisas realizadas, é evidente que essas substâncias têm um papel significativo na melhoria dessas áreas da saúde. Além disso, mediante métodos práticos, foi possível demonstrar que se pode obter um açúcar produzido à base de Sisal que apresenta essas características benéficas.

Essa descoberta não só estimula o mercado brasileiro, mas também oferece um destino inovador e valioso para o produto, diversificando as possibilidades de utilização do Sisal. A produção de um adoçante alternativo ao tradicional açúcar de cana-de-açúcar representa uma importante inovação. Esse novo produto tem o potencial de reduzir a incidência de doenças como diabetes e hipertensão arterial, que são prevalentes em diversas regiões e entre diferentes classes sociais. A aplicabilidade única desse projeto em variados contextos de saúde pública destaca sua relevância e potencial impacto positivo.

Complementarmente, os métodos utilizados para a extração dos componentes de interesse foram descritos de forma detalhada, assim como os processos necessários para a efetiva transformação em açúcar. Essas informações foram apresentadas de maneira suficientemente clara para demonstrar a viabilidade prática dessa inovação na indústria alimentícia. Portanto, ao detalhar os procedimentos e resultados alcançados, as pesquisadoras conseguiram atingir sua maior meta: garantir a eficiente aplicação da pesquisa. A possibilidade de implementar esse novo tipo de adoçante em larga escala nas indústrias alimentícias representa um avanço significativo, com benefícios claros para a saúde pública e a economia.

O projeto visa também a promover benefícios ambientais, uma vez que a produção desse novo tipo de adoçante será mais sustentável e menos prejudicial ao meio ambiente. Essa abordagem inovadora pode resultar em um impacto positivo tanto para a saúde pública quanto para a preservação ambiental, destacando a importância e a relevância da pesquisa desenvolvida. Espera-se que o projeto alcance resultados promissores e contribua para a melhoria da qualidade de vida das pessoas, ao oferecer uma alternativa saudável e sustentável ao açúcar convencional.

Referências Bibliográficas

- [1] Abreu, C. D. D. Efeitos Da Inulina No Metabolismo De Camundongos. 2022. 59 F. Dissertação (Mestrado Em Alimentos E Saúde) - Instituto De Ciências Agrárias, Universidade Federal De Minas Gerais, Montes Claros. 2022. Disponível Em: <Http://Hdl.Handle.Net/1843/41241>. Acesso Em: 12 Abr. 2024.
- [2] Alves Filho, M. O Açúcar Da Chicória. *Jornal Da Unicamp*, Campinas, N. 188, 2-8 De Set. 2002. Disponível Em: Ttps://Www.Unicamp.Br/Unicamp/Unicamp_Hoje/Ju/S Etembro2002/Unihoje_Ju188pag3a.Ht Ml>. Acesso Em: 20 Abr. 2024.
- [3] Aurelio, M. Diabetes Tipo 2: Além Do Açúcar Fatores E Causas. *Doutor Ajuda*. Disponível Em: <Https://Portaldoutorajuda.Com.Br/Diabetes-Tipo-2/>. Acesso Em: 8 Maio 2024.
- [4] De Figueira, D. S. Avaliação De Pré-Tratamentos Químicos No Bagaço De Sisal. 2017. 110 F. Tese (Doutorado Em Engenharia Química), Centro De Ciências E Tecnologia, Universidade Federal De Cam- Pina Grande, Campina Grande , 2017.
- [5] Generoso, G. B. Análise Do Potencial Biotecnológico Dos Resíduos Industriais De Sisal: Uma Revisão. 2021. 36p. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharelado Em Ciências Biológicas) - Departamento De Biologia, Centro De Ciências Humanas E Biológicas, Universidade Federal De São Carlos, Sorocaba.2021. Disponível Em: <Https://Repositorio.Ufscar.Br/Handle/Ufscar/14603>. Acesso Em: 28 Maio 2024.
- [6] Lacerda, T. M. Hidrólise De Polpa De Sisal Como Via De Produção De Etanol E Materiais. 2015. 115 F. Tese (Doutorado Em Química), Instituto De Química De São Carlos, Universidade De São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível Em: <Https://Doi.Org/10.11606/T.75.2012.Tde- 24072012-162331>. Acesso Em: 23 Abr. 2024.
- [7] Lima,C.S.S. Caracterização Da Composição Lignocelulósica De Sisal (Agave Sisalana) Para Produção De Etanol. 2013. 47 F. Trabalho De Conclusão De Curso (Licenciatura Em Química), Centro De Educação E Saúde, Universidade Federal De Campina Grande, Cuité, 2013. Disponível Em:<Http://Lattes.Cnpq.Br/8657035626498502>.Acesso Em: 20 Abr. 2024.
- [8] Medeiros, L. L De. Processo Biotecnológico De Edulcorantes A Partir Do Hidrolisado Do Sisal (Agave Sisalana). 2019. 138 P. Tese (Pós-Graduação Em Ciências E Tecnologia De Alimentos) - Centro De Tecnologia, Universidade Federal Da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível Em: <Https://Repositorio.Ufpb.Br/Jspui/Han-Dle/123456789/19 305>. Acesso Em: 28 Maio 2024.
- [9] Kaschuk, J-J. Hidrólise Enzimática Da Polpa Celulósica De Sisal. 2014. 170 F. Dissertação (Mestrado Em Ciências), Instituto De Química De São Carlos, Universidade De São Paulo, São Carlos, 2014. Doi 10.11606/D.75.2014.Tde-09022015-161718.Disponível Em:<Https://Doi.Org/10.11606/D.75.2014.Tde-09022015- 161718>. Acesso Em: 20 Jun. 2024.
- [10] Souza, R. (2011). Extração E Quantificação De Inulina A Partir Da Raiz De Chicória. *Instituto Municipal De Ensino Superior De Assis*.
- [11] Speretta, G; Leite, R-D; Duarte, A-C, Obesidade, Inflamação E Exercício: Foco Sobre O Tnf- α E Il- 10, *Revista Hospital Universitário Pedro Ernesto*, V. 13, N. 1, 2014.
- [12] Takahashi, M. E. Análise Das Atividades Anti-Inflamatória E Toxicológica Do Extrato Alcoólico Da Agave Sisalana: Um Estudo In Vitro. 2020. 77 P. Dissertação (Mestrado Em Biociências) - Faculdade De Ciências E Letras, Universidade Estadual Paulista, Assis, 2020.
- [13] Kordowska-Wiater. M. Production Of Arabitol By Yeasts: Current Status And Future Prospects. *Journal Of Applied Microbiology*, Lublin., V. 119, N. 2, P. 303-314, Ago. 2015. Doi 10.1111/Jam.12807. Disponível Em: <Https://Academic.Oup.Com/Jambio/Article-Abstract/119/2/303/6 716890?Redirectedfrom=Fullt Xt>. Acesso Em: 12 Abr. 2024.

- [14] Paula, M. P De; Lacerda, T. M; Frollini, E; Et Al. Hidrólise Ácida De Celulose De Sisal: Estudos Visando Obtenção De Nanofibras E De Bioetanol. Instituto De Química De São Carlos, Universidade De São Paulo, 2009.
- [15] Fornari Junior, C-C. M.; Sales, J-H ; Brandão, C. S De S. Comparação Das Propriedades Mecânicas De Compósitos De Poliéster Com Sisal Natural E Tratadas Superficialmente Com Sacarose Invertida. The Journal Of Engineering And Exact Sciences, V. 8, N. 10, P. 1-13; Nov. 2022. Doi 10.18540/Jcecvl8iss10pp15047-01i. Disponível Em: <<https://periodicos.ufv.br/jcec>>. Acesso Em: 20 Abr. 2024.
- [16] Bianchini, V, K; Assumpção, M. R. A Diferenciação De Produtos Na Cadeia Produtiva Do Açúcar: O Processo De Produção Dos Açúcares Líquido E Líquido Invertido. In: Xxii Encontro Nacional De Engenharia De Produção. 2002, Curitiba. Disponível Em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2002_tr11_0983.pdf F> Acesso Em: 20 Abr. 2024.
- [17] Cantalino, A. L ; Torres, E. A. Prospecção Tecnológica Sobre Processos E Equipamentos Para O Desfibramento Do Sisal E Outras Plantas Fibrosas Com Base No Depósito De Patentes. Cadernos De Prospecção, V. 7, N. 3, P. 399–408, 2014.