ESTUDO DO PRÉ-TRATAMENTO DE COROA DE ABACAXI COMO ETAPA NO PROCESSO DE SACARIFICAÇÃO ENZIMÁTICA

Autores: Jéssica da Cunha Machado, Allana Hand Santiago, Laura Rocha Candido, Jussara Moreira Coelho

Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/n, Bairro Guararema, Alegre – ES - 29500-000, jessicacunhamachado@gmail.com, allanahandsantiago@gmail.com, lauracandidorocha@gmail.com, jmoreiracoelho@yahoo.com.br.

Resumo
A coroa de abacaxi apresenta potencial para a produção de bioetanol por ser uma biomassa de baixo custo e elevada disponibilidade, rica em componentes lignocelulósicos. Este trabalho avaliou a sacarificação enzimática da fração celulósica da coroa de abacaxi submetida a diferentes pré-tratamentos alcalinos. Foram avaliadas concentrações de 0, 1 e 5% (m/v) de NaOH em autoclave, e posteriormente comparados os métodos de autoclave, micro-ondas e ultrassom utilizando NaOH 1% (m/v). As amostras foram caracterizadas quanto aos teores de celulose, hemicelulose e lignina. O pré-tratamento em micro-ondas com NaOH 1% apresentou maior eficiência entre os tratamentos com essa concentração, promovendo 39,59% de remoção de lignina, 12,89% de hemicelulose e aumento de 86% na exposição da celulose, sendo selecionado para a hidrólise enzimática. Após 96 horas de hidrólise, foram obtidos 14,02 g L^{-1} de açúcares redutores, com 23,6% de conversão da celulose em glicose. Os resultados indicam que o pré-tratamento alcalino assistido por micro-ondas favorece a sacarificação da coroa de abacaxi, demonstrando potencial para sua utilização na produção de bioetanol.
Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica. Pré-tratamento alcalino. Ultrassom. Micro-ondas.

Área do Conhecimento: Ciências da Saúde, Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Introdução

O esgotamento dos combustíveis fósseis, a preocupação ambiental relacionada à emissão de gases de efeito estufa e o aumento da demanda por energia têm impulsionado a busca por combustíveis mais ecológicos (Pandiyan *et al.,* 2019). Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias para a produção de etanol utilizando resíduos alimentares e de processamento agrícola tem sido cada vez mais incentivado, destacando-se a biomassa lignocelulósica por sua elevada disponibilidade e baixo custo (Gupta *et al.,* 2014). Além de não competir diretamente com a produção de alimentos, essa biomassa possibilita o aproveitamento de resíduos agrícolas para obtenção de produtos de maior valor agregado.

A coroa de abacaxi é uma matéria-prima alternativa e subutilizada, constituída por celulose, hemicelulose e lignina, apresentando potencial para a produção de etanol. No Espírito Santo, foram produzidos 44.747.000 frutos de abacaxi em 2024 (IBGE, 2025), sendo gerada elevada quantidade de resíduos durante sua produção e processamento (Abdullah, 2007). Entretanto, a estrutura recalcitrante da biomassa lignocelulósica dificulta o acesso das enzimas à celulose, tornando necessário o pré-tratamento, responsável pela remoção ou modificação da lignina, hidrólise da hemicelulose e redução da cristalinidade da celulose, favorecendo a hidrólise enzimática (Cardona; Sánchez, 2007). Diferentes métodos de pré-tratamento vêm sendo estudados, incluindo processos químicos, físicos e físico-químicos, como micro-ondas e ultrassom (Kumar; Sharma, 2017; Hassan; Williams; Jaiswal, 2018).

Diante da disponibilidade de resíduos lignocelulósicos e da necessidade de desenvolver alternativas para sua valorização, a coroa de abacaxi constitui uma matéria-prima promissora para obtenção de açúcares fermentescíveis. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a sacarificação enzimática da fração celulósica da coroa de abacaxi submetida a pré-tratamento com hidróxido de sódio associado à autoclave, micro-ondas ou ultrassom.

Metodologia

As coroas de abacaxi foram obtidas com comerciantes de Alegre/ES, separadas em suas unidades constituintes, secas em secador de bandejas a 50 °C por 96 horas, moídas em moinho de facas e

peneiradas para obtenção de partículas menores que 425 µm. Posteriormente, foram acondicionadas em embalagens plásticas e armazenadas a 5 °C para as análises. Os procedimentos foram realizados nos Laboratórios do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre/ES.

A coroa de abacaxi seca e moída foi submetida, em triplicata, a pré-tratamentos na proporção sólido/líquido 1:10, utilizando soluções de hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações de 0, 1 e 5% (m/v), associadas à autoclave. As amostras foram submetidas a 121 °C por 30 minutos. A partir dos resultados obtidos, foi selecionada a concentração de NaOH que promoveu maior exposição da celulose e remoção de hemicelulose e lignina. Essa concentração foi utilizada nos pré-tratamentos em micro-ondas e ultrassom. No micro-ondas, as amostras foram submetidas a 1150 W, frequência de 2450 MHz, durante 3 minutos; no ultrassom, foram submetidas a 30 °C, frequência de 25 kHz, durante 20 minutos. Após os pré-tratamentos, as amostras foram filtradas a vácuo, lavadas com água destilada, secas em estufa a 50 °C por 24 horas e armazenadas a 5 °C (Mori, 2015; Pereira, 2013).

As coroas *in natura* e pré-tratadas foram caracterizadas, em triplicata, quanto aos teores de celulose, hemicelulose e lignina, utilizando os procedimentos descritos por Morais, Rosa e Marconcini (2010), com alterações. Os teores de cinzas e extrativos também foram determinados para a caracterização da biomassa. Os efeitos dos pré-tratamentos na exposição da celulose e remoção de hemicelulose e lignina foram avaliados em função da composição da coroa de abacaxi não tratada.

O melhor pré-tratamento foi selecionado com base na análise estatística e a biomassa pré-tratada foi submetida à hidrólise enzimática, em triplicata, utilizando complexo de celulases CeluMax C (Prozyn). Para a hidrólise, 10 g de coroa pré-tratada foram ressuspendidas em 100 mL de tampão citrato de sódio (pH 4,8), utilizando concentração enzimática de 0,3%, e incubadas a 60 °C, sob agitação de 150 rpm. Foram avaliados quatro tempos de hidrólise (24, 48, 72 e 96 horas), com coleta de alíquotas do sobrenadante em cada período. A concentração de açúcares redutores foi determinada pelo método do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), com leitura espectrofotométrica a 540 nm, utilizando curva padrão de glicose. A conversão de celulose em glicose foi calculada a partir da concentração de glicose obtida no hidrolisado e do teor de celulose da biomassa pré-tratada.

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), em triplicata. Os dados referentes aos pré-tratamentos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a hidrólise enzimática, os dados referentes aos diferentes tempos também foram submetidos à ANOVA e ao teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa GENES (Cruz, 2013).

Resultados

A coroa de abacaxi *in natura* apresentou teores médios de 28,69% de celulose, 30,03% de hemicelulose e 10,23% de lignina. A análise de variância indicou efeito significativo das concentrações de NaOH sobre os teores de hemicelulose e lignina ($p \leq 0,05$), enquanto não houve efeito significativo sobre o teor de celulose ($p > 0,05$). Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Teores de celulose, hemicelulose e lignina (em base seca) para a coroa de abacaxi pré-tratada em autoclave com diferentes concentrações de NaOH.

Pré-tratamento	Celulose	Hemicelulose	Lignina
0% NaOH	42,27a	38,99a	5,32b
1% NaOH	46,95a	29,81b	10,89a
5% NaOH	44,72a	26,79b	3,79b
CV (%)	4,75	8,39	20,61

Legenda: as médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: produção das autoras.

Os teores de celulose variaram de 42,27 a 46,95%, sem diferença significativa entre os tratamentos. Para a hemicelulose, os menores teores foram obtidos com 1 e 5% de NaOH, que não diferiram entre si. Para a lignina, o tratamento com 1% de NaOH apresentou o maior teor (10,89%), enquanto 0 e 5% apresentaram menores valores. Considerando os resultados obtidos e o menor consumo de reagente, a concentração de 1% de NaOH foi selecionada para comparação dos métodos de pré-

tratamento. A análise de variância dos tratamentos em autoclave, micro-ondas e ultrassom, todos com NaOH 1% (m/v), indicou efeito significativo sobre os teores de celulose, hemicelulose e lignina ($p \leq 0,05$). Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Teores de celulose, hemicelulose e lignina (em base seca) para a coroa de abacaxi pré-tratada em autoclave, micro-ondas e ultrassom com solução de NaOH 1% (m/v).

Pré-tratamento	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Autoclave	46,95b	29,82a	10,89a
Micro-ondas	53,42a	26,16ab	6,18b
Ultrassom	57,87a	24,11b	6,91ab
CV(%)	4,84	7,58	21,63

Legenda: as médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: produção das autoras.

Os tratamentos em micro-ondas e ultrassom apresentaram os maiores teores de celulose (53,42 e 57,87%, respectivamente), enquanto a autoclave apresentou 46,95%. Para hemicelulose, os valores foram 29,82, 26,16 e 24,11%, respectivamente. Os teores de lignina foram de 10,89% para autoclave, 6,18% para micro-ondas e 6,91% para ultrassom. As porcentagens de remoção de hemicelulose e lignina após os diferentes pré-tratamentos estão apresentadas na Tabela 3.

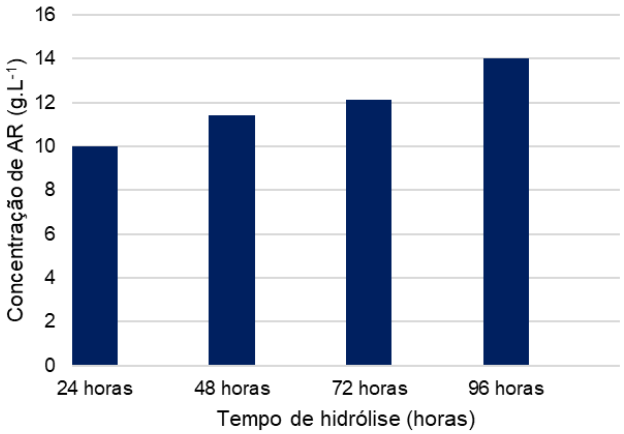
Tabela 3 – Porcentagem de remoção de hemicelulose e lignina após os pré-tratamentos.

Pré-tratamento	% de remoção de hemicelulose	% de remoção de lignina
0% de NaOH em autoclave	0	48,00
1% de NaOH em autoclave	4,03	0
5% de NaOH em autoclave	10,76	62,95
1% de NaOH em micro-ondas	12,89	39,59
1% de NaOH em ultrassom	19,71	32,45

Fonte: produção das autoras.

A remoção de hemicelulose variou de 0 a 19,71%, sendo o maior valor obtido no ultrassom com NaOH 1%. Para lignina, a remoção variou de −6,45 a 62,95%, sendo o maior valor obtido com 5% de NaOH em autoclave. Entre os tratamentos com NaOH 1%, o micro-ondas apresentou 39,59% de remoção de lignina, seguido do ultrassom (32,45%) e da autoclave (0%). Considerando os teores das frações lignocelulósicas e as porcentagens de remoção, o pré-tratamento em micro-ondas com NaOH 1% (m/v) foi selecionado para a hidrólise enzimática, que foi avaliada após 24, 48, 72 e 96 horas. O perfil de concentração de açúcares redutores está apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Perfil de hidrólise enzimática, expresso em concentração de açúcar redutor (AR) em função do tempo, para a amostra de coroa de abacaxi pré-tratada em micro-ondas com solução de NaOH 1% (m/v).



Fonte: produção das autoras.

A análise de variância indicou efeito significativo do tempo de hidrólise sobre a concentração de açúcares redutores ($p \leq 0,05$). Os resultados do teste de Tukey estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios de açúcares redutores (g L^{-1}) em relação aos diferentes tempos de hidrólise enzimática.

Tempo de hidrólise	Concentração de açúcares redutores (g.L^{-1})
24 horas	10,014d
48 horas	11,397c
72 horas	12,129b
96 horas	14,019a
CV (%)	1,35

Legenda: as médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: produção das autoras.

A concentração de açúcares redutores aumentou de 10,014 g L^{-1} em 24 horas para 14,019 g L^{-1} em 96 horas, sendo os tratamentos estatisticamente diferentes entre si. A conversão de celulose em glicose foi de 23,6%.

Discussão

Os teores obtidos para a coroa de abacaxi *in natura* apresentaram valores próximos aos encontrados para outras biomassas lignocelulósicas. O teor de celulose (28,69%) foi próximo aos valores observados por Silva C. *et al*. (2018), em folhas de abacaxi (25%), e Torreiro *et al*. (2016), em palha de trigo (33,7%). A hemicelulose (30,03%) foi semelhante aos valores encontrados por Torreiro *et al*. (2016) e Pereira *et al*. (2015), enquanto a lignina (10,23%) foi próxima aos valores obtidos por Santos (2018) e Pereira *et al*. (2015). As diferenças entre os resultados podem estar relacionadas à origem da biomassa, às condições ambientais de crescimento, colheita e armazenamento e aos métodos empregados na análise (Foyle *et al*., 2007; Farinas *et al*., 2010).

O aumento observado no teor de celulose após os pré-tratamentos está associado à remoção ou alteração de componentes da matriz lignocelulósica, principalmente hemicelulose e lignina, aumentando proporcionalmente a fração celulósica. A remoção dessas frações favorece a exposição da celulose e sua acessibilidade às enzimas durante a hidrólise (Shimizu, 2018).

Entre os tratamentos com NaOH 1%, micro-ondas e ultrassom apresentaram maiores teores de celulose e menores teores de hemicelulose em relação à autoclave. O micro-ondas também apresentou a maior remoção de lignina entre os tratamentos realizados com 1% de NaOH (39,59%). Esses resultados são compatíveis com Perrone (2015), que relacionou o ultrassom à intensificação da remoção de hemicelulose e as micro-ondas à remoção de lignina em meio alcalino.

Os resultados encontrados são comparáveis aos relatados na literatura, embora diferenças nas condições de pré-tratamento influenciem a eficiência de remoção. Velmurugan e Muthukumar (2011), por exemplo, obtiveram 70% de remoção de lignina utilizando ultrassom com NaOH 2%, enquanto Keshwani (2009) obteve 58% utilizando micro-ondas com NaOH 1%. Assim, a concentração do reagente, temperatura, tempo e características da biomassa podem explicar as diferenças observadas.

A seleção do micro-ondas com NaOH 1% para a hidrólise foi baseada, principalmente, na maior remoção de lignina entre os tratamentos conduzidos com a concentração selecionada de NaOH. A redução da lignina é importante por aumentar a acessibilidade das enzimas à celulose e favorecer sua conversão em açúcares (Siqueira G., 2015).

O aumento da concentração de açúcares redutores de 10,014 para 14,019 g L^{-1} entre 24 e 96 horas indica que o prolongamento da hidrólise favoreceu a liberação de açúcares nas condições avaliadas. Comportamento semelhante foi observado por Silva J. *et al*. (2018) na hidrólise enzimática de resíduos de abacaxi. A concentração obtida no presente estudo foi inferior à relatada por Silva J. *et al*. (2018), que obtiveram 58,44 g L^{-1} de glicose, e por Silva C. *et al*. (2018), que obtiveram 31,02 g L^{-1}. Sukumaran *et al*. (2009) também obtiveram valores superiores para palha de arroz (26,30 g L^{-1}) e bagaço de cana (17,79 g L^{-1}).

A conversão de celulose em glicose obtida (23,6%) foi superior aos valores encontrados por Oliveira (2012) para bagaço (11,1%) e palha de cana-de-açúcar (5%), mas inferior aos 70% obtidos por Silva C. *et al*. (2018). A maior conversão observada por esses autores pode estar relacionada à utilização de concentração de NaOH aproximadamente oito vezes superior à empregada no presente estudo.

A eficiência da hidrólise depende das características do substrato, propriedades das enzimas e carga de sólidos, além das condições de pré-tratamento (Reyes *et al*., 1998; Zhuang *et al*., 2016). Dessa forma, as diferenças entre os estudos podem ser atribuídas às diferentes matérias-primas e condições experimentais, como concentração de reagente, temperatura, tempo e método de pré-tratamento (Pereira, 2013).

Conclusão

Os resultados demonstraram que o pré-tratamento com NaOH 1% (m/v) associado ao micro-ondas foi o mais indicado, promovendo redução de hemicelulose e lignina e aumento da exposição da celulose. Na hidrólise enzimática, o tempo de 96 horas proporcionou a maior concentração de açúcares redutores (14,02 $g.L^{-1}$), com conversão de celulose em glicose de 23,6%, indicando o potencial da coroa de abacaxi como matéria-prima para a produção de etanol. Contudo, são necessários estudos complementares para avaliar a etapa de fermentação e a eficiência dos demais pré-tratamentos na conversão de celulose em glicose.

Referências

ABDULLAH, A. Solid and liquid pineapple waste utilization for lactic acid fermentation using Lactobacillus delbrueckii. Reaktor, v. 11, n. 1, p. 50-52, 2007.

CARDONA, C. A.; SÁNCHEZ, Ó. J. Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. Bioresource Technology, v. 98, n. 12, p. 2415-2457, 2007.

FARINAS, C. S.; MARTIN-NETO, L.; GIORDANO, R. C. Instrumentação e Automação na Agroindústria da Cadeia Cana-Etanol. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Editora Blucher, 2010, p. 601-617.

FOYLE, T.; JENNINGS, L.; MULCAHY, P. Compositional analysis of lignocellulosic materials: Evaluation of methods used for sugar analysis of waste paper and straw. Bioresource technology, v. 98, n. 16, p. 3026-3036, 2007.

GUPTA, V. K.; POTUMARTHI, R.; O'DONOVAN, A.; KUBICEK, C. P.; SHARMA, G. D.; TUOHY, M. G. Bioenergy research: an overview on technological developments and bioresources. In: GUPTA, V. K.; TUOHY, M. G.; KUBICEK, C. P.; SADDLER, J.; XU, F. (Eds.). Bioenergy research: Advances and Applications, Chapter 2, p. 23-47, 2014.

HASSAN, S. S.; WILLIAMS, G. A.; JAISWAL, A. K. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, v. 262, p. 310-318, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção agropecuária de abacaxi 2024. IBGE, 2025.

KESHWANI, D. R. Microwave pretreatment of switchgrass for bioethanol production. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual da Carolina do Norte, Carolina do Norte, 2009.

KUMAR, A. K.; SHARMA, S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. Bioresources and Bioprocessing, v. 4, p. 1-19, 2017.

MORI, N. R. Etanol celulósico a partir da palha e do bagaço de cana-de-açúcar: pré-tratamentos e conversão biotecnológica não convencionais. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

PANDIYAN, K.; SINGH, A; SINGH, S.; SAXENA, A. K.; NAIN, L. Technological interventions for utilization of crop residues and weedy biomass for second generation bio-ethanol production. Renewable Energy, v. 132, p. 723-741, 2019.

PEREIRA, J. C.; MARQUES, N. P.; RODRIGUES, A.; OLIVEIRA, T. B.; BOSCOLO, M.; SILVA, R.; GOMES, E.; MARTINS, D. A. B. Thermophilic fungi as new sources for production of cellulases and xylanases with potential use in sugarcane bagasse saccharification. Journal of Applied Microbiology, v. 118, p. 928-939, 2015.

PERRONE, O. M. Avaliação térmica e estrutural do bagaço de cana de açúcar pré-tratado com ozônio, ultrassom e micro-ondas para produção de etanol celulósico por hidrólise enzimática. 2015. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2015.

REYES, J.; PERALTA-ZAMORA, P.; DURÁN, N. Hidrólise enzimática de casca de arroz utilizando-se celulases: efeitos de tratamentos químicos e fotoquímicos. Química Nova, v. 21, p. 140-143, 1998.

SANTOS, M. L. G. Processo pirolítico da biomassa residual do abacaxi. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2018.

SHIMIZU, F. L. Remoção de lignina e hemicelulose: influência na acessibilidade à celulose e sacarificação enzimática. 2018. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Aplicada) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2018.

SILVA, C. N.; BRONZATO, G. R. F.; CESARINO, I.; LEÃO, A. L. Second-generation ethanol from pineapple leaf fibers. Journal of Natural Fibers, v. 17, p. 113-121, 2018.

SILVA, J. S.; MALTA, V. R. S.; SANTOS-ROCHA, M. S. R.; ALMEIDA, R. M. R. G.; GOMES, M. A.; VICENTE, C. D.; BARBOSA, K. L. Hidrólise enzimática, fermentação e produção de biocombustíveis através da coroa de Ananas comosus. Química Nova, v. 41, n. 10, p. 1127-1131, 2018.

SIQUEIRA, G. A. Efeito da lignina de bagaços de cana-de-açúcar pré-tratados na hidrólise enzimática da celulose. 2015.Tese (Doutorado em Biotecnologia Industrial) – Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

TORREIRO, M. G.; M. LÓPEZ-ABELAIRAS, M., LU-CHAU, T. A.; LEMA, J. M. Fungal pretreatment of agricultural residues for bioethanol production. Industrial Crops and Products, v. 89, p. 486-492, 2016.

VELMURUGAN, R.; MUTHUKUMAR, K. Utilization of sugarcane bagasse for bioethanol production: Sono-assisted acid hydrolysis approach. Bioresouce Technology, v. 102, p. 7119-7123, 2011.

ZHUANG, X.; WANG, W.; YU, Q.; QI, W.; WANG, Q.; TAN, X.; ZHOU, G. & YUAN, Z. Liquid Hot Water Pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production accompanying with high valuable products. Bioresource Technology, v. 199, p. 68-75, 2016.