



# OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DESLIGNIFICAÇÃO ALCALINA EM FOLHAS DA COROA DO ABACAXI: ANÁLISE DO NÚMERO KAPPA E ESPECTROSCOPIA FTIR

## OPTIMIZATION OF ALKALINE DELIGNIFICATION CONDITIONS IN PINEAPPLE CROWN LEAVES: KAPPA NUMBER AND FTIR SPECTROSCOPY ANALYSIS

**Eulina Fernandes Damião**, Mestranda, PME/UEG/CET, eulina@aluno.ueg.br  
**Larissa Caetano Silva**, graduanda, PME/UEG/CET, graduanda, larissasilvacatanott@aluno.ueg.br  
**Vitória Aparecida de Sousa Xavier**, PME/UEG/CET, graduanda, vitoria.xavier@aluno.ueg.br  
**Rejane Dias Pereira Mota**, Pós-Doutoranda, PME/UEG/CET, rejane.mota@ifg.edu.br  
**Diego Palmiro Ramirez Ascheri**, Prof. Pós-Doutor, PME/UEG/CET, diego.ascheri@ueg.br  
**José Luis Ramírez Ascheri**, Pesquisador, Embrapa Agroindústria de Alimentos, jose.ascheri@embrapa.br

**Resumo:** A biomassa residual do abacaxizeiro, rica em celulose, é frequentemente descartada após a colheita, subutilizando um recurso com potencial para aplicações de alto valor agregado. Contudo, durante a extração da lignina, sua recondensação compromete a eficiência da remoção de celulose. Este estudo buscou otimizar as condições de deslignificação alcalina em folhas da coroa de abacaxi em biorreator, avaliando o Número Kappa ( $K_p$ ) e espectrofotometria FTIR. Foram testadas concentrações de NaOH (1%, 2% e 3%) e tempos de extração (1,5, 2,0 e 2,5 h), com análise estatística (ANOVA, teste de médias e PCA; com  $p$ -valor  $\leq 0,5$ ). O tratamento com 3% NaOH por 2,5 h promoveu a maior remoção de lignina (84,3%), resultando em polpa celulósica com  $K_p = 8,1$ , porém acarretou maior recondensação de lignina e perda de celulose. Já, o uso de 2% NaOH por 1,5 h removeu 83,9% da lignina, produzindo polpa celulósica com  $K_p = 8,3$ , com menor teor residual de lignina e maior preservação de celulose. Conclui-se que essa última condição equilibra eficiência na deslignificação e manutenção da qualidade da celulose, sendo a mais adequada para aplicações sustentáveis.

**Palavras-chave:** *Ananas comosus*. Sustentabilidade. Celulose. Aproveitamento de subprodutos. Análise instrumental.

**Abstract:** Pineapple residual biomass, rich in cellulose, is often discarded after harvest, underutilizing a resource with potential for high-value applications. However, during lignin extraction, its recondensation compromises cellulose removal efficiency. This study aimed to optimize alkaline delignification conditions in pineapple crown leaves using a bioreactor, evaluating the Kappa Number ( $K_p$ ) and FTIR spectrophotometry. Different NaOH concentrations (1%, 2%, and 3%) and extraction times (1.5, 2.0, and 2.5 h) were tested, with statistical analysis (ANOVA, mean test, and PCA;  $p$ -value  $\leq 0.5$ ). Treatment with 3% NaOH for 2.5 h promoted the highest lignin removal (84.3%), resulting in cellulosic pulp with  $K_p = 8.1$ , but caused greater lignin recondensation and cellulose loss. In contrast, 2% NaOH for 1.5 h removed 83.9% lignin, producing cellulosic pulp with  $K_p = 8.3$ , lower residual lignin content, and higher cellulose preservation. It is concluded that the latter condition balances delignification efficiency and cellulose quality maintenance, being the most suitable for sustainable applications.

**Keywords:** *Ananas comosus*. Sustainability. Cellulose. By-product utilization. Instrumental analysis.

## INTRODUÇÃO

A biomassa do abacaxizeiro é uma matéria-prima promissora para a produção de bioinsumos agrícolas, contribuindo para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a dependência de insumos químicos sintéticos. Após a colheita, a biomassa residual do abacaxizeiro é frequentemente descartada, sendo incorporada ao solo ou deixada no campo até o próximo ciclo produtivo (SOUSA et al., 2022). No entanto, resíduos industriais provenientes do processamento do abacaxi contêm teores expressivos de celulose, variando entre 36,3% e 46,85% de sua massa seca (SANTOS et al., 2013; ABDUL KARIM et al., 2022), o que destaca seu potencial para aplicações de alto valor agregado.

Para o aproveitamento eficiente dessa biomassa, a extração da celulose exige tratamentos capazes de remover lignina e hemiceluloses sem comprometer a estrutura da celulose (LEE et al., 2014). Dentre os processos mais empregados, destaca-se a deslignificação alcalina, na qual soluções de hidróxido de sódio (NaOH) são utilizadas para romper a matriz lignocelulósica. A eficácia desse processo depende de variáveis como concentração do álcali, temperatura e tempo de reação (TRIASUTI, 2021; ABDUL KARIM et al., 2022; NGUYEN et al., 2022). Entretanto, além da eficiência na remoção da lignina, é fundamental minimizar sua recondensação e evitar a degradação da celulose, garantindo um material final com propriedades adequadas para diferentes aplicações (LI et al., 2010).

A eficiência da deslignificação é frequentemente avaliada por meio do Número Kappa (Kp), que quantifica a lignina residual na polpa celulósica (CORREIA et al., 2019). Valores elevados de Kp indicam maior teor de lignina remanescente, enquanto valores mais baixos sugerem uma remoção mais eficiente desse componente. Além disso, técnicas espectroscópicas, como a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), permitem caracterizar as mudanças estruturais na celulose e na lignina após os diferentes tratamentos, possibilitando uma análise mais detalhada do impacto das condições aplicadas.

Biomassas de diferentes origens vegetais apresentam variações estruturais significativas, que influenciam a eficiência do pré-tratamento e os rendimentos de extração de celulose. Estudos

demonstram que materiais lignocelulósicos, como bagaço de cana-de-açúcar e palha de sorgo, requerem abordagens distintas de deslignificação para otimizar a remoção da lignina e a preservação da celulose (BARUAH et al., 2018; OYDEJI et al., 2020; MELESSE et al., 2022). Da mesma forma, as folhas do abacaxizeiro apresentam teores variáveis de lignina (23–52%) dependendo das condições ambientais e do estágio de maturação (BARBOZA et al., 2014), o que reforça a necessidade de otimizar as condições do processo para essa biomassa específica.

Pelo exposto, o presente estudo teve como objetivo otimizar as condições do processo de deslignificação alcalina das folhas da coroa do abacaxi, utilizando o Número Kappa como resposta para quantificar a remoção da lignina. Além disso, foram analisadas as alterações estruturais dos componentes da biomassa por meio da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), a fim de compreender melhor os efeitos das condições aplicadas na integridade da celulose e possíveis reações de recondensação da lignina.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Pesquisa I de Química e do Centro de Análises, Inovação e Tecnologia em Ciências Naturais e Aplicadas da (CAITEC) do Câmpus Central - Sede: Anápolis - CET - Henrique Santillo da Universidade Estadual de Goiás (Anápolis - GO).

A biomassa provinda da coroa do abacaxi da variedade Pérola foi fornecida pela Fazenda Cachoeira, localizada nas proximidades da Br 070, do município de Jaraguá-GO. No mesmo dia da coleta, a biomassa foi acondicionada em caixa de papelão e conduzida até o Laboratório onde as folhas sadias foram selecionadas, descartando as fissuradas, injuriadas por insetos e secas e, posteriormente, desidratada em estufa com recirculação de ar forçada a 80 °C até massa constante. A biomassa seca foi triturada em moinho tipo Willy, de rotor vertical com 4 facas móveis e 4 facas fixas (SPLabor, SP-31), equipado com uma malha de 1 mm de abertura, até obter tamanhos com granulometria  $\leq 1$  mm. Seguidamente, o material moído foi armazenado em frascos de vidro com tampa hermética.

A polpa bruta (PBr) da biomassa foi extraída empregando a metodologia descrita por Ascheri et al. (2024), com modificações. O delineamento



experimental foi inteiramente casualizado em arranjo fatorial completo  $3^2$ , sendo dois fatores com 3 níveis e três repetições por cada tratamento. O primeiro fator foi composto pela solução de NaOH (1,0%, 2,0% e 3,0%, m/m), e o segundo fator foi o tempo de extração (TE = 1,5, 2,0 e 2,5 h). A polpação foi conduzida em biorreator BIO-TEC, onde a biomassa e o NaOH em proporção de 1/20 (m/v) foram transferidas para o vaso do biorreator, seguido de aquecimento constante a 70 °C, sob agitação contínua a 700 rpm por um tempo determinado pelo planejamento experimental adotado. Após a extração, a PBr foi lavada com água destilada até pH neutro, seguida de secagem a 45 °C até massa constante.

O Kp foi determinado segundo procedimento T236 om-06 (TAPPI, 2006). A metodologia se baseia na oxidação da lignina residual da PBr por permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ), em meio ácido, e titulação iodométrica com tiosulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ). Amostras de ~0,3 g foram tomadas e suspensas em béqueres com 10 mL de água. Após 5 min de agitação, a suspensão foi transferida a um Erlenmeyer de 500 mL no adicionou-se mais 140 mL de água, a ~25 °C sob agitação. Adicionou-se 25 mL de uma solução padrão recém-preparada de  $\text{KMnO}_4$  0,1 N, misturada com 25 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  4 N, em um Erlenmeyer de 250 mL, mantido a 25 °C sob agitação durante 10 min (solução A). A solução foi adicionada quantitativamente a cada Erlenmeyer contendo a amostra, lavando as paredes do vidro com 50 mL de água destilada. Após 10 min de agitação, foram adicionados 5,0 mL de uma solução recém preparada de KI 0,1 N. A mistura contendo a polpa, foi titulada com uma solução padronizada de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  0,1 N até chegar próximo ao ponto de viragem (desaparecimento da cor castanha). Imediatamente, adicionou-se 2,5 mL de uma solução 2% de amido, prosseguindo à titulação até a viragem de cor azul a incolor. Em um experimento paralelo foi quantificado o consumo de  $\text{KMnO}_4$  sem a adição de polpa (branco), esta foi substituída por 150 mL de água destilada seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. Para a determinação foram utilizadas as Equações 1, 2 e 3:

$$P = [(b-a) \cdot N] / 0,1 \quad (1)$$

$$f = 0,0084 \cdot P + 0,895 \quad (2)$$

$$Kp = [P \cdot f \cdot (1 + 0,013 \cdot (25-T))] / m \quad (3)$$

Em que: P = volume de  $\text{KMnO}_4$  que reagiu durante a reação (mL); a = volume de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

consumido pela amostra analisada (mL); b = volume de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  consumido pelo branco (mL); f = fator de correção determinado para cada P; N = normalidade da solução de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ; T = temperatura da análise (°C); m = massa da polpa seca (g).

A deslignificação da biomassa também foi monitorada envolvendo técnicas de análise por espectroscopia FTIR segundo Barros *et al.* (2020). Utilizou-se um espectrofotômetro de infravermelho da Perkin Elmer (modelo Spectrum Frontier FT-IR/NIR; Perkin Elmer, Norwalk, CT), na região espectral entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$ , com uma resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ . As amostras foram previamente secas em estufa a  $60 \pm 1$  °C por 12 h, trituradas e misturadas com KBr na proporção de 1/100 (m/m). Foram determinadas a intensidade de pico dos principais grupos funcionais da celulose, hemicelulose e lignina e os principais grupos funcionais da degradação ou recondensação da lignina presentes nas amostras.

Os valores médios de Kp obtidos ao final da polpação da biomassa foram expressos em forma de Tabela e gráfico de metodologia de superfície de resposta (RSM). A significância dos efeitos dos fatores e de sua interação foi testada aplicando-se a análise de variância (ANOVA) a 5% de probabilidade. Quando significativas, as médias foram comparadas com o teste Duncan ao mesmo nível de significância anterior. A correlação dos valores de Kp, intensidade e porcentagens dos picos analisados nos espectros do FTIR, foi realizada por meio de análise multivariada de componentes principais (ACP). As análises estatísticas e gráficos foram gerados com o auxílio do software Statistica 14.1 (TIBCO Software Inc, 2020).

## RESULTADOS

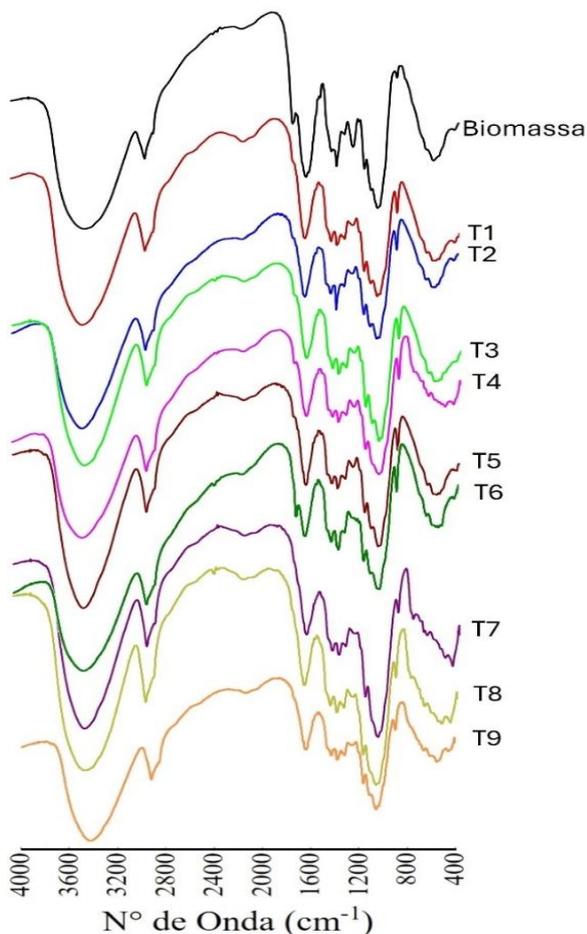
Os resultados do Kp (Tabela 1) e dos espectros FTIR (Figura 1) das polpas brutas evidenciaram alterações da estrutura e composição química da biomassa devido aos efeitos de NaOH e TEx, revelados pela ANOVA (Tabela 2), efeitos significativos de NaOH (F = 174,8;  $p < 0,01$ ), do TEx (F = 10,9;  $p < 0,01$ ) e de sua interação (F = 61,7;  $p < 0,01$ ) sobre Kp.

**Tabela 1** – Valores médios e desvios padrão dos valores do Número Kappa (Kp) da biomassa e das polpas brutas, e intensidade de pico dos principais constituintes lignocelulósicos e de recondensation da lignina.

Trat.	NaOH (%)	TEx (h)	Kp	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )					
				898	2920	1600-1680	1200-1280	1330-1380	
			Biomassa	51,5±2,2	0,81	5,20	-	-	-
T1	1	1,5	21,8±1,7 <sup>a</sup>	3,69	6,44	-28,9	7,1	33,9	
T2	1	2,0	17,8±0,3 <sup>b</sup>	1,26	4,27	-7,1	-4,1	4,3	
T3	1	2,5	17,2±1,6 <sup>b</sup>	3,11	5,91	-3,7	-2,0	6,3	
T4	2	1,5	8,3±0,3 <sup>e</sup>	2,79	4,78	-5,0	-3,6	3,2	
T5	2	2,0	12,1±0,3 <sup>d</sup>	2,18	4,21	-2,5	-3,4	2,5	
T6	2	2,5	16,9±1,3 <sup>bc</sup>	2,65	3,16	-2,0	-1,5	2,2	
T7	3	1,5	15,6±0,7 <sup>c</sup>	2,00	7,18	-1,8	-2,3	4,2	
T8	3	2,0	9,5±0,3 <sup>e</sup>	2,67	9,92	-5,5	-6,2	3,8	
T9	3	2,5	8,1±0,4 <sup>e</sup>	1,45	4,90	-1,0	-2,0	1,5	

Trat. – tratamentos; NaOH – concentração de hidróxido de sódio; TEx – tempo de extração.

A interação da ANOVA foi desdobrada. Fixando NaOH (Figura 2), o efeito maior do TEx foi detectado em 2% e 3% de NaOH (F = 62,1 e 51,9, respectivamente; p < 0,01). Fixando TEx (Figura 2), a variabilidade devido a NaOH foi maior em 1,5 h (F = 151,4; p < 0,01).



**Figura 1** – Espectros do FTIR da biomassa e das polpas brutas.

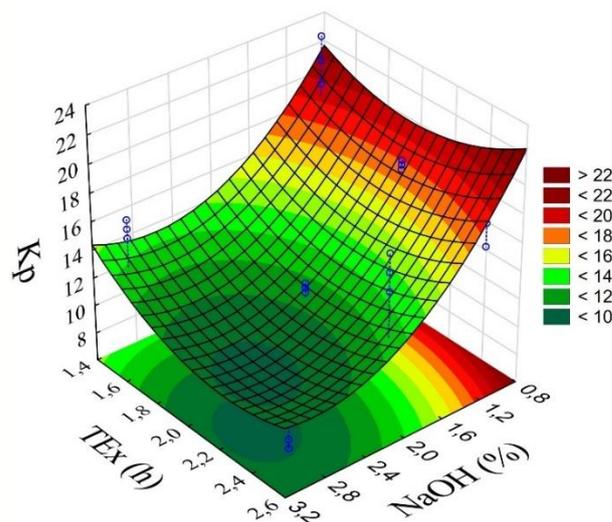
As bandas de número de onda dos principais constituintes lignocelulósicos das amostras e dos compostos produzidos devido à recondensation da lignina residual foram obtidas a partir dos espectros FTIR (Figura 1). Essas bandas e a intensidade de pico também estão registradas na Tabela 1.

As porcentagens de recondensation da lignina residual foram registradas nas bandas 1600–1680 cm<sup>-1</sup> (Tabela 1) que sugere a formação de estruturas lignínicas mais condensadas. As bandas em 1200–1280 e 1330–1380 cm<sup>-1</sup> evidenciaram modificações nos grupos funcionais e nas ligações que sustentam a estrutura da lignina.

**Tabela 2** – Análise de variância dos resultados do Número Kappa em função da concentração do hidróxido de sódio (NaOH) e tempo de agitação (700 rpm), a 70 °C.

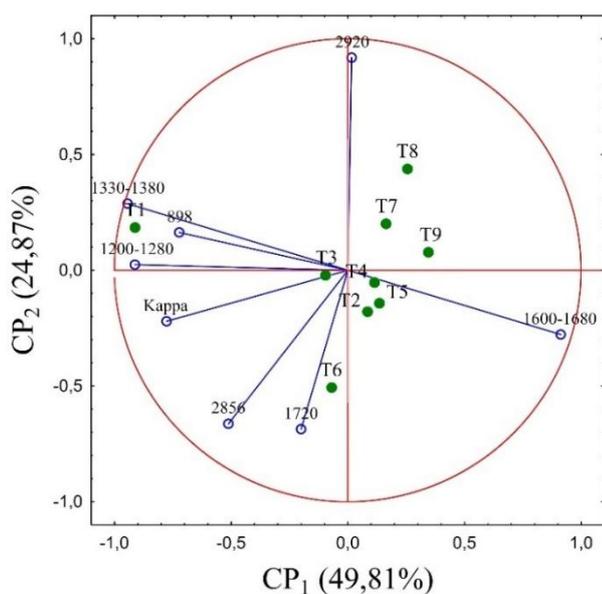
F. V.	gl	SQ	MQ	F
NaOH	2	318,1	159,0	174,8**
Fixando tempo				
Tempo: 1%NaOH	2	36,9	18,5	20,3**
Tempo: 2%NaOH	2	113,1	56,5	62,1**
Tempo: 3%NaOH	2	94,5	47,3	51,9**
Tempo	2	19,9	9,9	10,9**
Fixando NaOH				
NaOH: 1,5 h	2	275,4	137,7	151,4**
NaOH: 2,0 h	2	107,7	53,8	59,2**
NaOH: 2,5 h	2	159,7	79,8	87,7**
NaOH x Tempo	4	224,7	56,2	61,7**
Erro	18	16,4	0,9	
Total	26	579,0		

**Figura 2** – Gráfico de superfície de resposta dos efeitos do NaOH e tempo de extração (TEx) na variação dos valores do Número Kappa (Kp) das polpas brutas e da biomassa de folhas da coroa do abacaxi.



Os resultados da análise de componentes principais estão descritos na Figura 3, o utilizou-se para agrupar amostras com propriedades semelhantes. Na representação gráfica da Figura 3, cada eixo explica uma porcentagem da variação total que existe entre as amostras. O primeiro eixo explica a maior parte da variabilidade (CP1 = 49,81%), seguido pelo segundo eixo (CP2= 24,87%), que juntos representam 74,68% da variação dos resultados. O restante da variação (25,32%) foi devido a outros componentes principais, que não foram representados pelo fato que os primeiros componentes principais explicam mais do 70 da variação dos resultados (YASUMURA *et al.*, 2012).

**Figura 3** – Análises de componentes principais dos resultados obtidos pela determinação de Kp e dos espectros do FTIR das amostras de polpa bruta e biomassa de folhas da coroa do abacaxi em função da concentração de hidróxido de sódio e tempo de extração.



## DISCUSSÃO

A variação observada em Kp pode ser atribuída aos mecanismos químicos envolvidos na remoção da lignina durante a polpação alcalina, conforme evidenciado pelos espectros de FTIR. A eficiência da deslignificação está diretamente relacionada à capacidade do NaOH de romper ligações éter (R-O-R') e carbono-carbono (C-C) na estrutura da lignina (XU *et al.*, 2025). A combinação das variáveis NaOH e TEx permitiu a remoção de 57% a 85% da lignina presente na biomassa, devido à ação dos íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) do NaOH, dissolvidos no meio reacional, que atuam sobre

as ligações éter, promovendo sua ruptura e a formação de fragmentos solúveis de lignina.

Os resultados da ANOVA indicaram que o efeito de TEx dependeu do efeito do NaOH, sendo que ambas as variáveis exerceram influências significativas na eficiência da deslignificação. O teste de Duncan (Tabela 1) identificou tratamentos com valores de Kp estatisticamente diferentes, evidenciando que o valor de Kp diminuiu à medida que os níveis das variáveis estudadas foram aumentando (Figura 1). Ao comparar os tratamentos T1 a T3 e T7 a T9, observou-se uma redução de  $21,8 \pm 1,7$  para  $17,2 \pm 1,6$  e de  $15,6 \pm 0,7$  para  $8,1 \pm 0,4$ , respectivamente. Em contrapartida, nos tratamentos T4 a T6 houve um aumento do valor de Kp com o prolongamento do tempo de extração, passando de  $8,3 \pm 0,3$  para  $16,9 \pm 1,3$ .

Li *et al.* (2010) associaram esse fenômeno a condições drásticas de extração – elevadas concentrações de NaOH e tempos excessivos – que provocam alterações estruturais na lignina, levando a um aumento do Número Kappa devido à recondensação. Este fato provavelmente se deve à recondensação da lignina (KOMATSU; YOKOYAMA, 2021). Em meio alcalino, a quebra das ligações β-O-4 da lignina gera radicais livres. Esses radicais podem se recombinar, formando novas ligações carbono-carbono (C-C) mais estáveis, que são difíceis de remover (SMITH; DIMMEL, 1994). Fragmentos de lignina com grupos fenólicos podem atacar eletrofilicamente outros fragmentos, levando à formação de estruturas condensadas (LIU *et al.*, 2019). Em baixas concentrações de NaOH, há insuficiência de íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) para estabilizar os fragmentos de lignina durante a solubilização, favorecendo a recondensação (KOMATSU; YOKOYAMA, 2022). Além disso, a presença de componentes interferentes, como açúcares degradados (furfural) ou extrativos da biomassa, pode reagir com a lignina, formando complexos recalcitrantes (pseudolignina) (PU *et al.*, 2013).

Os tratamentos T4, T8 e T9 apresentaram valores de Kp estatisticamente semelhantes (Tabela 1), com rendimentos médios de remoção da lignina de 83,9%, 81,6% e 84,3%, respectivamente. No entanto, a escolha do tratamento adequado não deve se basear exclusivamente na remoção da lignina e hemiceluloses, mas também na preservação da estrutura celulósica e na prevenção da recondensação da lignina.

A Figura 3 evidencia que o tratamento T9 apresentou o menor valor de Kp ( $8,1 \pm 0,4$ ), sugerindo uma remoção mais intensa da lignina devido à utilização de 3% de NaOH por 2,5 h. O tratamento T4 também demonstrou alta eficácia, com Kp próximo ( $8,3 \pm 0,3$ ), empregando menor concentração de álcali (2% de NaOH) e menor tempo de extração (1,5 h). Por outro lado, o tratamento T8, apesar de utilizar 3% de NaOH por 2 h, apresentou um valor de Kp ligeiramente superior ( $9,5 \pm 0,3$ ), indicando uma eficiência menor na remoção da lignina em comparação com T4 e T9. Entretanto, para avaliar a eficiência desses tratamentos, é essencial considerar a preservação estrutural da celulose e possíveis modificações na lignina.

A análise espectroscópica FTIR (Figura 1) revelou diferenças na integridade estrutural da celulose e da lignina após os diferentes tratamentos. A banda em  $898\text{ cm}^{-1}$ , associada à celulose, especificamente à ligação  $\beta$ -1,4-glicosídica, indicou maior intensidade nos tratamentos T4 (2,79) e T8 (2,67), sugerindo uma melhor preservação da estrutura celulósica. Em contraste, T9 apresentou um valor significativamente menor (1,45), indicando degradação da celulose devido às condições mais drásticas do tratamento. Esses resultados podem estar relacionados à maior concentração de NaOH e ao maior tempo de extração empregados no tratamento T9, que podem ter causado hidrólise das ligações glicosídicas.

A banda em  $2920\text{ cm}^{-1}$ , correspondente ao estiramento C-H de cadeias alifáticas (ABDELAZIZ; HULTEBERG, 2017) evidenciou diferenças na retenção de extrativos, lipídeos ou porções laterais da lignina. O tratamento T8 apresentou a maior intensidade (9,92), sugerindo uma possível recondensação ou retenção de extrativos. Em contrapartida, os tratamentos T4 (4,78) e T9 (4,90) mostraram valores significativamente menores, indicando menor presença desses componentes. Isso sugere que T8 pode ter favorecido reações químicas que estabilizam grupos alifáticos, enquanto T4 e T9 removeram mais eficientemente esses compostos.

A remoção da lignina foi confirmada pela análise das bandas entre  $1600$  e  $1680\text{ cm}^{-1}$  (ABDELAZIZ; HULTEBERG, 2017), associadas ao esqueleto aromático da lignina. O tratamento T9 apresentou um valor próximo de zero (-1), indicando uma remoção substancial da lignina. Em contraste, T4 (-5) e T8 (-5,5) ainda demonstraram sinais mais intensos nesta faixa,

sugerindo a presença de grupos aromáticos residuais ou possível recondensação lignínica. A recondensação pode ser um efeito colateral do tratamento alcalino, especialmente quando não há remoção completa dos fragmentos lignínicos solubilizados.

As bandas situadas entre  $1200$ - $1280\text{ cm}^{-1}$  e  $1330$ - $1380\text{ cm}^{-1}$ , correspondentes aos estiramentos C-O-C e às deformações dos anéis aromáticos, respectivamente, auxiliaram na avaliação da integridade da estrutura lignínica (ABDELAZIZ; HULTEBERG, 2017). O tratamento T9 apresentou valores de menor magnitude (-2 e 1,5), reforçando a hipótese de que a estrutura lignínica foi significativamente degradada ou removida. O tratamento T4 exibiu valores intermediários (-3,6 e 3,2), enquanto T8 apresentou maiores intensidades (-6,2 e 3,8), indicando uma possível maior preservação ou recondensação da lignina. Essa maior preservação estrutural da lignina em T8 pode estar associada a um mecanismo de reação que envolve estabilização parcial da rede polimérica lignínica.

Esses resultados demonstram que, embora o tratamento T9 tenha promovido uma remoção mais eficaz da lignina, também resultou em maior degradação da celulose. O tratamento T4 apresentou um balanço mais adequado entre remoção da lignina e preservação da estrutura celulósica, enquanto T8 indicou maior retenção de componentes alifáticos e possível recondensação lignínica. Dessa forma, a escolha do tratamento ideal deve considerar não apenas a eficiência na deslignificação, mas também a integridade estrutural da celulose e possíveis modificações na lignina, a fim de garantir um material final com propriedades adequadas para aplicações desejadas.

## CONCLUSÕES

Os diferentes tratamentos alcalinos estudados apresentaram variações significativas na remoção da lignina e na preservação da celulose, destacando a importância de um equilíbrio entre esses fatores. O tratamento T9 foi o mais eficiente na deslignificação, mas também promoveu maior degradação da celulose.

O tratamento T8 indicou uma maior retenção de compostos alifáticos e possível recondensação lignínica, o que pode influenciar a qualidade final do material tratado. Já o tratamento T4 demonstrou uma abordagem mais equilibrada, removendo lignina de forma eficiente enquanto preservava melhor a estrutura

celulósica. Isto demonstra que a deslignificação da biomassa das folhas da coroa do abacaxi é maximizada em condições de 2% NaOH por 1,5 h, obtendo-se uma polpa bruta com valor de  $K_p = 8,3$ , que combinou alta remoção de lignina com menor impacto nos carboidratos, conforme evidenciado pelos valores moderados em  $898 \text{ cm}^{-1}$  (2,79).

## AGRADECIMENTOS

À Plataforma institucional de Pesquisa e Inovação em Bioinsumo e Pró-Laboratórios (UEG), à CAPES pela concessão de bolsas, à Embrapa Agroindústria de Alimentos e PIBIC/CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, O. Y.; HULTEBERG, C. P. Physicochemical characterisation of technical lignins for their potential valorisation. **Waste Biomass Valor**, v. 8, p. 859–869, 2017.

ABDUL KARIM, M. S.; ZAINOL, N.; ABU HASSAN AS'ARI, N. I. A.; MAT HUSSAIN, N. S.; Aziz, N. H. Application of soda pulping method in cellulose extraction process from pineapple leaf. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, part 3, p. 1208-1214, 2022.

ASCHERI, D. P. R.; BARROS, B. P. J.; ASCHERI, J. L. R.; SIGNINI, R. Potential use of cellulose soybean hulls as a source of carboxymethyl cellulose for coating bean seeds. **Ciência & Agrotecnologia**, v. 48 n. e003924, 2024.

BARBOZA, R. M. P.; SENA-NETO, A. R.; SOUZA, F. V. D.; MATTOSO, L. H. C.; MARCONCINI, J. M. Caracterização e correlação de propriedades mecânicas e constituintes químicos de doze variedades de abacaxis (gênero Ananas). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos. Anais .... São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014.

BARROS, B. P. J.; ASCHERI, D. P. R.; SANTOS, M. L. S.; MORAIS, C. C.; ASCHERI, J. L. R.; SIGNINI, R. et al. Soybean hulls: Optimization of the pulping and bleaching processes and carboxymethyl cellulose synthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 144, s/n, p. 208–218, 2020.

BARUAH, J.; Nath, B. K.; Sharma, R.; Kumar, S.; Deka, R. C.; Baruah, D. C.; Kalita, K. Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-

added products. **Frontiers in Energy Research**, v. 6, s/n. p. 140, 2018.

CORREIA, F. M., D'ANGELO, J. V. H.; SILVA Jr., F. G. Revisitando Número Kappa: Conceitos e aplicações na indústria de celulose. **O Papel**, v. 80, n. 7, p. 77-89, 2019.

KOMATSU, T.; YOKOYAMA, T. Revisiting the condensation reaction of lignin in alkaline pulping with quantitativity part III: predominant formation of  $\alpha$ - $\beta$ -type over  $\alpha$ -5-type condensation product in soda cooking treatments of apocynol and creosol. **Journal of Wood Science**, v. 68, n. 60, 2022.

KOMATSU, T.; YOKOYAMA, T. Revisiting the condensation reaction of lignin in alkaline pulping with quantitative part I: the simplest condensation between vanillyl alcohol and creosol under soda cooking conditions. **Journal of Wood Science**, v. 67, n. 45, p. 1-12, 2021.

LEE, H. V., HAMID, S. B. A., ZAIN, S. K. Conversion of Lignocellulosic Biomass to Nanocellulose: Structure and Chemical Process. **The Scientific World Journal**, v. 2014, n. 631013, p. 1-20, 2014.

LI, M-F; FAN, Y-F; SUN, R-C.; XU, F. Characterization of extracted lignin of bamboo (*Neosinocalamus affinis*) pretreated with sodium hydroxide/urea solution at low temperature. **BioResources**, v. 5, n. 3, p. 1762-1778, 2010.

LIU, C.; WU, S.; ZHANG, H.; XIAO, R. Catalytic oxidation of lignin to valuable biomass-based platform chemicals: A review. **Fuel Processing Technology**, v. 191, s/n., p. 181-201, 2019.

MELESSE, G. T.; HONE, F. G.; MEKONNEN, M. A. Extraction of cellulose from sugarcane bagasse optimization and characterization. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, n. 1712207, p. 1-10, 2022.

NGUYEN, L.; TU, G. C.; LE, T. P.; DO, N. H. N.; TRAN, V. T.; MAI, T. P.; LE, T. V.; LE, K. A.; LE, P. T. K. Microfibrillated cellulose from pineapple leaves for synthesizing novel thermal insulation aerogels. **Chemical Engineering Transactions**, v. 97, p. 61-66, 2022.

OYDEJI, O.; GITMAN, P.; QU, J.; WEBB, E. Understanding the impact of lignocellulosic biomass variability on the size reduction process: a review. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 6, p. 2327-2343, 2020.

PU, Y.; HU, F.; HUANG, F.; DAVISON, B. H.; RAGAUSKAS, A. J. Assessing the molecular structure basis for biomass recalcitrance during dilute acid and hydrothermal pretreatments. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 6, n. 15, 2013.

SANTOS, R. M. Extração e caracterização de nanocristais de celulose a partir de folhas de abacaxi. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SMITH, D. A.; DIMMEL, D. R. Electron transfer reactions in pulping systems viii. reactions of syringyl alcohol in aqueous alkali; *Journal of Wood Chemistry and Technology*, v. 14, n. 279, p., 1994.

SOUSA, D. B.; MENDONÇA, M. A. S.; LIMA, L. O. Subproduto do abacaxi (*Ananas comosus* L) como alternativa de volumoso para alimentação de ruminantes. **PUBVET**, v. 16, n. 10 a1232, p. 1-7, 2022.

TAPPI. Kappa number of pulp. T 236 om-06. Atlanta: *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 2006.

TIBCO Software Inc. *Data Science Workbench*, version 14. 2020. <http://tibco.com>.

TRIASUTI, W. E. Effect of alkali treatment on processing of pineapple leaf fibers. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY**, ICCST – 2020, Chemical Science and Technology Innovation for a Better Future, 2020. Anais... [S. l.: s. n.], 2021.

XU, Y.; WANG, D.; LUO, B.; ZHANG, X.; HUANG, Y.; ZHUANG, H.; SHU, R. Boosting aromatic monomer yield of lignin hydrogenolysis by using Co/C coupled with NaOH catalyst. **Renewable Energy**, v. 240, p. 122239, 2025.