

## Artigo de Revisão

# Influência da densidade básica e da composição química da madeira para a indústria de polpa celulósica: um estudo de caso

Influence of basic density and chemical composition of wood for the pulp industry: a case study

Rafaella Dias Ramos<sup>I</sup>   
Dalton Longue Junior<sup>I</sup>   
Fernando José Borges Gomes<sup>II</sup>   
Natielly Cristine Gomes de Medeiros<sup>I</sup> 

<sup>I</sup>Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, Brasil

<sup>II</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil

## RESUMO

Os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* representam as principais espécies madeireiras que formam as florestas plantadas utilizadas pelo setor de celulose no Brasil, e por isso muitos estudos são realizados correlacionando as características tecnológicas da madeira, as variáveis do processo de polpação e a qualidade da polpa celulósica. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre os estudos que relacionam a densidade básica e a composição química da madeira com as variáveis de processo de polpação e com as características da polpa celulósica. Foi utilizado o princípio do estudo exploratório por meio de uma revisão de literatura. Os principais estudos utilizados nesta pesquisa apontaram que os melhores clones de eucalipto utilizados na indústria de polpa apresentaram densidade básica entre 400 e 550 kg/m<sup>3</sup>, rendimento em polpa não branqueada entre 45 e 55%, número kappa 17-18 e viscosidade da polpa marrom superior a 1200 g/cm<sup>3</sup>. Com relação aos melhores clones do gênero *Pinus*, estes apresentaram densidade básica variando entre 370 e 440 kg/m<sup>3</sup>, menor que a variação verificada para o *Eucalyptus*; rendimento similar aos estudos com *Eucalyptus*, variando entre 45 e 51%; e número kappa 30-32, maior que o utilizado em cozimentos com madeira de *Eucalyptus*. Os resultados obtidos neste trabalho permitiram concluir que dentre as características da madeira, a densidade básica foi a mais utilizada nas indústrias de celulose para nortear o rendimento do processo, enquanto o teor de extrativos e relação S/G da lignina foi pouco apresentada pelas pesquisas.

**Palavras-chave:** Qualidade da madeira; *Eucalyptus*; *Pinus*; Celulose

## ABSTRACT

---

The Eucalyptus and Pinus represent the main woody species in planted forests used by the pulp sector in Brazil, and for this reason, many studies have been carried out correlating the wood technological characteristics and the pulp quality. The objective of this work was to perform a literature review about studies that correlate basic density and wood chemical composition with pulping process variables and pulp characteristics. The work followed the principle of an exploratory study, through a literature review was used. The main studies used in this research showed that the best clones used in the eucalyptus pulp industry had a basic density varying between 400 and 550 kg.m<sup>-3</sup>, a unbleached pulp yield varying between 45 and 55%, a kappa number of 17-18 and a viscosity of brown pulp over than 1200 g.cm<sup>-3</sup>. Com relação aos melhores clones do gênero Pinus. Regarding to the best Pinus genus clones, they had a basic density varying between 370 and 440 kg.m<sup>-3</sup>, lower than the Eucalyptus variation; similar yield to the Eucalyptus studies, ranging from 45 to 51%; and kappa number of 30-32, higher than that used in cooking with eucalyptus wood.

**Keywords:** Wood quality; Eucalyptus, Pinus, Cellulose

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), o Brasil possui uma área de 9,94 milhões de hectares com plantios de árvores comerciais, sendo considerado um país de referência mundial quando o assunto é produtividade, sendo a do eucalipto de 7,6 milhões ha/ano<sup>-1</sup> e a do pinus 1,9 milhões ha/ano<sup>-1</sup>. Como vantagem comparativa para produção florestal, o Brasil possui condições edafoclimáticas favoráveis que estimulam o setor florestal a investir em pesquisa e desenvolvimento das melhores técnicas de silvicultura, melhoramento e manejo florestal, bem como em práticas industriais sustentáveis.

As principais madeiras utilizadas pelo setor de polpa celulósica no Brasil pertencem aos gêneros Eucalyptus e Pinus, e representam 75,8% e 19,4%, respectivamente, da área total de árvores plantadas. A polpa celulósica proveniente dessas madeiras representa 59% dos produtos exportados, e por isso o Brasil foi considerado como o segundo maior produtor e o maior exportador de celulose no mercado mundial em 2021 (IBÁ, 2022).

Nesse cenário, a madeira é considerada uma matéria-prima de importância econômica para o setor de celulose, devido seu elevado custo de cultivo, transporte

e processamento, e que merece estudos prévios à sua utilização para uma melhor eficiência dos processos e maior aproveitamento. Por tratar de um produto heterogêneo, amostras distintas de uma mesma árvore podem apresentar propriedades tecnológicas (químicas, anatômicas, físicas e mecânicas) significativamente diferentes; por ser um material anisotrópico, apresenta diferentes propriedades tecnológicas quando considerados seus três planos de observação; e é higroscópico por apresentar variação na sua umidade de acordo com a umidade relativa e temperatura atmosféricas. Essas variações da madeira causam efeitos significativos na qualidade dos produtos finais.

Nesse contexto, é importante ressaltar que não existe apenas uma característica tecnológica para determinar a qualidade da madeira para a produção de polpa celulósica, e sim uma combinação de características físicas (densidade básica) e químicas (teor de celulose, hemiceluloses, ligninas, extrativos), por exemplo, apontando a forte relação dessas características da madeira com o rendimento e a qualidade da polpa não branqueada (MORAIS, 2008). A densidade básica é utilizada na maioria das pesquisas para expressar a qualidade da madeira (KOLLMANN, 1959), pois além de exigir uma instrumentação mais simples para sua determinação, tem influência na qualidade do produto e expressa relações altamente significativas com quase todas as demais propriedades tecnológicas.

De maneira ainda mais específica em relação ao processo de polpação, a composição química da madeira afeta o consumo de reagentes químicos no digestor, o rendimento depurado e o teor de sólidos no licor negro (GOUVÊA; TRUGILHO; COLODETTE; LIMA; DA SILVA; GOMIDE, 2009), desta forma, compreender a natureza química da madeira é essencial para compreender os estudos de aperfeiçoamento das variáveis da polpação e das características do produto final.

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre a influência da densidade básica e da composição química da madeira nas principais variáveis do processo de polpação e nas características da polpa celulósica não branqueada.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Pesquisa e seleção do material bibliográfico

O trabalho seguiu o princípio do estudo exploratório por meio de uma revisão de literatura, desenvolvida a partir da seleção de material publicado nos últimos 20 anos, entre 2000 e 2021, composto por artigos científicos, dissertações e teses.

O material foi coletado nas revistas científicas, a seguir: Revista *Árvore*, *Scientia Forestalis*, *Ciência Florestal*, *Cerne*; e repositórios de teses e dissertações das seguintes universidades: Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), utilizando as seguintes palavras-chave: qualidade da madeira, eucalyptus, pinus e celulose.

Em seguida, foi feita uma leitura/triagem, considerando como critério de seleção as bibliografias que abordassem a influência da densidade básica e composição química da madeira nas variáveis de processo de polpação e nas características da polpa celulósica não branqueada.

Num terceiro nível de seleção, foram considerados os trabalhos que especificavam os gêneros dos clones/espécies *Eucalyptus* e *Pinus*, com informações sobre o espaçamento, a idade e o local dos cultivos das árvores, e que apresentaram claramente as variáveis de polpação temperatura, álcali ativo e sulfidez, que são as mais usuais nas fábricas ou adotadas em pesquisas nas universidades, bem como as características de rendimento, número kappa e viscosidade da polpa não branqueada.

### 2.2 Elaboração das planilhas de dados a partir do material bibliográfico selecionado

As informações extraídas das bibliografias selecionadas foram organizadas em planilhas do excel contendo as informações mais relevantes para esse estudo, a saber: i) plantios: espécies/clones, idade, espaçamento e local; ii) características da madeira:

densidade básica e composição química; iii) variáveis do processo de polpação: tempo total de cozimento, álcali ativo, sufidez; iv) características da polpa celulósica não branqueada: rendimento, número kappa e viscosidade.

### **2.3 Relações entre a qualidade da madeira, as variáveis do processo de polpação e as características da polpa celulósica não branqueada**

Para a discussão dos resultados foram estabelecidas relações matemáticas entre todas as variáveis selecionadas descritas no item anterior. O objetivo destas correlações foi verificar efeitos e influências entre qualidade da madeira, as variáveis do processo de polpação e as características da polpa celulósica não branqueada.

### **2.4 Comparação entre as características da polpa celulósica e as variáveis do processo de polpação**

Para entender ainda melhor a relação da densidade básica e da composição química da madeira com o processo de polpação e com a qualidade da polpa celulósica não branqueada, foi elaborado um gráfico comparativo contendo três diferentes tempos de cozimento considerados condições extremas: 140, 150 e 253 min. Essa comparação buscou entender em que condições deve-se alterar a variável carga alcalina, devido a variação da densidade básica e composição química, da madeira, bem como o reflexo dessa combinação na qualidade da polpa celulósica não branqueada.

Esta comparação foi realizada apenas para as madeiras do gênero *Eucalyptus*, devido a pouca quantidade de informações referentes às madeiras do gênero *Pinus*.

## **3 DESENVOLVIMENTO**

### **3.1 Avaliação das informações sobre caracterização tecnológica da madeira para produção de polpa celulósica**

Na primeira etapa de seleção dos materiais, foram selecionados 28 artigos e 45 dissertações/teses. Na segunda e terceira seleções, mais criteriosas, foram

considerados 19 artigos e 30 dissertações/teses, que além dos títulos, realmente se tratava de pesquisas com resultados e discussões relacionadas a qualidade da madeira (caracterização tecnológica) para produção de polpa celulósica não branqueada.

Com base nestes 49 trabalhos selecionados, foram coletados dados de 59 materiais genéticos (clones), dentre os quais 79,7% eram relativos ao gênero *Eucalyptus* (47 clones) e 20,3% pertenciam ao gênero *Pinus* (12 clones), sendo todos os trabalhos relacionados à produção de polpa celulósica não branqueada.

Fato importante constatado foi a falta de informação sobre os plantios florestais: a idade do clone, o espaçamento utilizado nos plantios e o local de procedência não foram informados em 28%, 57% e 28% dos trabalhos de eucalipto, respectivamente, e em 17%, 83% e 0% dos trabalhos de pinus, respectivamente.

Considerando as informações dos plantios: idade, espaçamento e procedência, como importantes, apenas 45% dos trabalhos sobre plantios de eucalipto e 0% dos trabalhos sobre plantio de pinus apresentaram todas estas informações.

Sobre a falta de informações, densidade básica e composição química completa, todos os trabalhos de eucalipto apresentaram a densidade básica, os teores de ligninas total, holocelulose e extrativos. Porém, destes trabalhos de eucalipto, 64% não apresentaram os teores de celulose e de hemiceluloses separadamente; e 36% não apresentou a relação S/G da lignina. A qualidade da madeira de pinus, em termos de densidade básica, teor de lignina total, holocelulose e extrativos, foi informada em todos os trabalhos. Por outro lado, os teores de celulose e hemiceluloses não foram informados separadamente em nenhum dos trabalhos selecionados.

Considerando as informações da qualidade da madeira: densidade básica e composição química completa, como importantes, apenas 30% dos trabalhos de eucalipto apresentou todas as informações, enquanto nenhum dos trabalhos de pinus foi completo. Isso demonstra que é preciso um maior investimento na realização de análises de qualidade da madeira para a avaliação do processo de polpação e qualidade da polpa celulósica, principalmente em trabalho que envolvem madeiras de pinus.

### 3.2 Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa celulósica não branqueada

Com base neste estudo de caso, o rendimento em polpa de eucalipto variou entre 47,3 e 57,6%, para uma variação de densidade básica entre 276 e 668 kg/m<sup>3</sup>, e o rendimento em polpa de pinus variou entre 44,2 e 50,7%, para uma variação de densidade básica entre 373 e 436 kg/m<sup>3</sup> (Figura 1A). É perceptível que a maioria dos resultados de densidade básica observada nos melhores clones de eucalipto para produção de polpa celulósica, em termos de rendimento, variaram entre 400 e 550 kg/m<sup>3</sup>, superior ao observado para as madeiras de pinus (373 e 436 kg/m<sup>3</sup>).

O rendimento em polpa não branqueada apresentou uma tendência de se manter constante com a variação da densidade básica para as madeiras de eucalipto, pois as condições operacionais dos processos de polpação são ajustadas visando um número kappa objetivo (17-18) e um maior rendimento possível. Entretanto, o rendimento da polpa não branqueada de pinus apresentou uma tendência de decréscimo à medida que a densidade básica da madeira aumentou, um sinal da necessidade de maior esforço para a deslignificação dessa madeira à medida que a sua densidade aumenta, e uma explicação da menor densidade dessas madeiras na indústria de polpa.

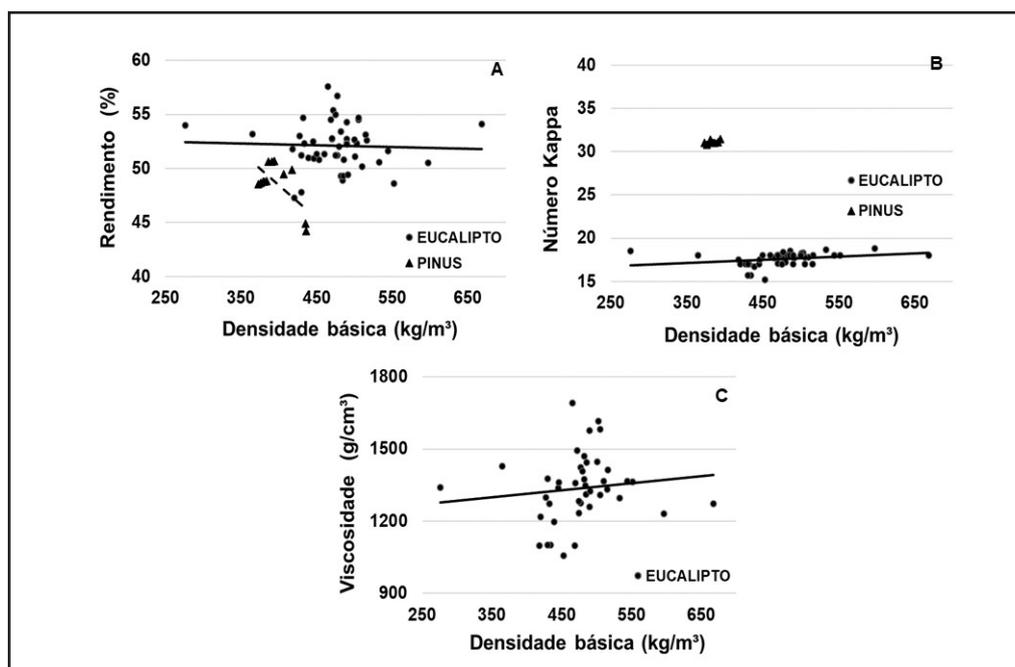
Apesar de a densidade básica das madeiras de pinus ser inferior a das madeiras de eucalipto, o rendimento em polpa celulósica foi similar, o que mostra ser possível conseguir bons rendimentos a partir de madeiras menos densas, desde que as variáveis do processo de polpação sejam devidamente ajustadas e controladas.

Madeiras com densidades básicas elevadas acompanhadas de altos teores de lignina tem como efeito a redução do rendimento do processo de polpação Kraft e o aumento do número kappa, considerando as mesmas condições de polpação (MEDEIROS NETO, 2012; QUEIROZ; GOMIDE; COLODETTE; DE OLIVEIRA, 2004). Estes autores mencionaram que este fato ocorre devido à maior dificuldade de impregnação dos cavacos de maior densidade, o que resulta em maior demanda de álcali no cozimento e, conseqüentemente, em rendimento depurado mais baixo.

Entretanto, madeiras de eucalipto com densidade média entre 450-550 kg/m<sup>3</sup> são recomendadas para uso na indústria de celulose (SANTOS, 2016) por permitirem melhor rendimento de cozimento associado a um menor consumo específico de madeira (PEREIRA; LONGUE JÚNIOR; MAFRA NETO; COLODETTE; GOMES, 2021).

Com relação ao número kappa da polpa não branqueada esta aumentou com a elevação da densidade básica da madeira, e variou entre 15,2 e 18,8 para os melhores materiais de eucalipto e de 30,9 a 31,5 para os melhores materiais de pinus, conforme Figura 1B.

Figura 1 – Influência da densidade básica da madeira com o rendimento em polpa não branqueada de eucalipto e pinus (A); número kappa da polpa não branqueada de eucalipto e pinus (B) e viscosidade da polpa não branqueada de eucalipto (C)



Fonte: Autores (2023)

O intervalo de número kappa 17-18 foi o mais observado em trabalhos relacionados às fábricas de celulose de fibra curta (eucalipto), em que madeiras mais densas são cozidas a um número kappa maior, visando o aumento do rendimento ou preservação das cadeias de celulose (maior viscosidade). Para fábricas que operam com fibra longa (pinus) o número kappa observado foi em torno de 30.

A escolha do número kappa em um processo industrial não depende apenas da densidade básica da madeira, e as fábricas variam as cargas alcalinas e outras variáveis de processo (tempo, temperatura e sulfidez) em função do número kappa objetivo, ou seja, do grau de deslignificação da polpa celulósica que se deseja alcançar ao final do processo.

Santos (2018) explicou que isso ocorre devido à presença de frações não celulósicas como lignina residual, teor de extrativos e ácidos hexenurônicos que a polpação não foi capaz de solubilizar, permanecendo estes na parede celular das fibras. Barbosa; Maltha; Silva e Colodette (2008) afirmaram que através da densidade básica do povoamento, estima-se a quantidade de carga alcalina que será utilizada, além do rendimento.

Por fim, as polpas de eucalipto apresentaram uma tendência de aumento da viscosidade à medida que a densidade básica da madeira aumentou (Figura 1C). A variação da viscosidade foi de 1055 a 1690  $\text{cm}^3/\text{g}$ , ficando a maioria dos valores encontrados no intervalo entre 1200 e 1500  $\text{cm}^3/\text{g}$  para uma variação de densidade básica entre 400 e 550  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

A madeira mais densa consome mais álcali ativo do que aquelas de baixa densidade e sofrem maior degradação dos carboidratos e, conseqüentemente, maior perda de viscosidade (MOKFIENSKI; COLODETTE; GOMIDE; CARVALHO, 2008; QUEIROZ; GOMIDE; COLODETTE; DE OLIVEIRA, 2004). Entretanto, em condições alcalinas elevadas necessárias para o cozimento de madeiras de maior densidade, a maior degradação/solubilização sofrida pelas hemiceluloses, carboidratos de menor peso molecular, justifica o comportamento de aumento da viscosidade, apesar da maior degradação sofrida pelas fibras (DEMUNER, 2014).

Diante dessa importante discussão sobre a densidade básica da madeira, as fábricas de celulose têm preferido trabalhar com madeiras de densidade média a levemente alta, afim de elevar a produtividade dos digestores e aumentar a produção diária da fábrica. Em outras palavras, a qualidade da polpa celulósica pode ser ajustada

dentro de certos limites durante o processo de polpação visando uma maior produção diária do digestor, o que proporciona um menor consumo específico de madeira no processo.

### **3.3 Influência da composição química da madeira na qualidade da polpa celulósica não branqueada**

A composição química da madeira exerce forte influência no processo de polpação e na qualidade da polpa não branqueada. Os rendimentos em polpa de eucalipto observados neste estudo foram acima de 50%, por se tratar de resultados de pesquisa de laboratório com clones de interesse industrial, enquanto o rendimento em polpa de pinus ficou ligeiramente abaixo de 50%.

O rendimento em polpa a partir das madeiras de eucalipto variou entre 47,3 e 57,6%, em que os resultados superiores a 50% se deram pelo fato do teor de holocelulose da madeira ter sido superior a 55%, chegando a 55% de rendimento quando o teor de holocelulose atingiu 70% (Figura 2A). Por outro lado, o rendimento da polpa decresceu de 56,7 para 54,7% à medida que o teor de lignina da madeira aumentou de 26,4 para 30,9% (Figura 2B), indicando o efeito negativo desse composto da madeira no rendimento em polpa de eucalipto.

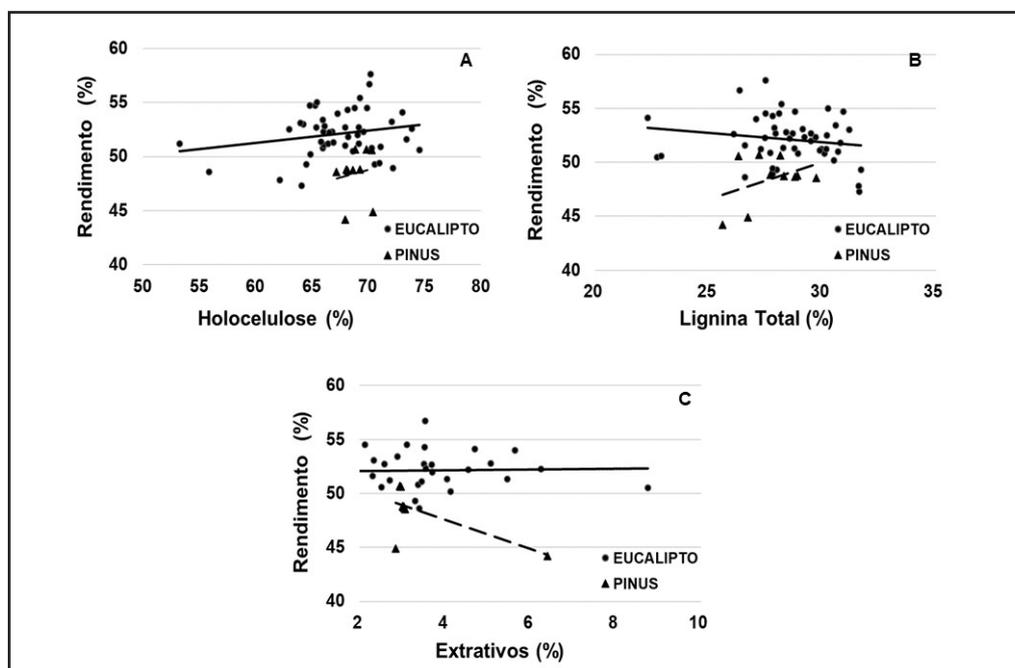
Sobre o teor de extrativos da madeira, não foi observado a tendência de influência no rendimento de polpas de eucalipto por serem madeiras que naturalmente apresentam baixos teores de extrativos, estando os valores variando entre 2,1 e 8,8%, em que a maioria dos valores estavam concentrados entre 2,1 e 4,1% (Figura 2C).

De acordo com Segura (2015), um alto teor de holocelulose afeta positivamente o rendimento dos processos de polpação. Perez (2002) concluiu que as madeiras que tiveram os maiores valores de rendimento depurado foram as que possuíam os menores teores de lignina total na composição química da sua madeira.

Rendimentos em polpa próximos a 55% são característicos de processos de polpação Kraft de madeiras de eucalipto de excelente qualidade, com elevados teores de holocelulose e baixos teores de lignina (SEGURA, 2015), e baixos teores de extrativos (DUARTE, 2007).

O rendimento em polpa observado nas madeiras de pinus variou de 44,2 a 50,7%, com aumento à medida que o teor de holocelulose aumentou de 67,2 para 70,3%, mesmo comportamento observado para as madeiras de eucalipto (Figura 2A). Entretanto, o rendimento em polpa não branqueada aumentou à medida que o teor de lignina aumentou de 25,6 para 29,7%, em parte explicado pela menor densidade básica da madeira de pinus facilitar a deslignificação, e em parte explicado pelo menor nível de deslignificação, ou seja, maior número kappa, observados nos trabalhos de polpação de madeira de pinus conforme Figura 2B. Com isso, é possível inferir que clones atuais com teores acima de 30% de lignina podem ser considerados menos indicados, enquanto materiais com teores abaixo de 30% de lignina são superiores em qualidade para produção de polpa celulósica.

Figura 2 – Influência do rendimento do processo de polpação com a composição química das madeiras de eucalipto e pinus: teor de holocelulose (A); teor de lignina total (B) e teor de extrativos (C)



Fonte: Autores (2023)

Em relação ao teor de extrativos das madeiras de pinus, o rendimento das polpas de pinus teve uma tendência clara de decréscimo à medida que o teor de extrativos

aumentou na madeira, diferente do observado para as madeiras de eucalipto, conforme Figura 2C. O teor de extrativos da madeira variou entre 2,8-6,4% para uma variação de rendimento entre 44,9-49,9%. Madeiras com maior teor de extrativos consomem mais reagentes de cozimento e branqueamento e rendem menos polpa no processo de polpação. Isso ocorre devido os extrativos causarem redução da alvura das polpas branqueadas e ser importante a sua prévia remoção dos processos de cozimento e branqueamento (WEHR, 1991; DUARTE, 2007; SEGURA, 2012).

Madeiras com menor teor de extrativos, próximos a 2-3%, são consideradas de melhor qualidade, enquanto aquelas com teor de extrativos na faixa de 5-8% são consideradas de menor qualidade. De acordo com Segura (2012) e Alves (2010), os extrativos é um dos componentes mais indesejáveis para o processo de polpação, uma vez que influencia negativamente o consumo de reagentes e o rendimento da polpa celulósica, sendo favorável a remoção da maior quantidade desses constituintes da madeira.

Importante perceber uma menor quantidade de trabalhos com o teor de extrativos da madeira para produção de polpa celulósica, principalmente quando estudaram madeiras de pinus, que mesmo se tratando de madeiras com, teoricamente, maiores teores de extrativos, foram encontrados trabalhos com materiais que apresentam uma quantidade baixa de teor de extrativos, em torno de 2,8% (VIVIAN; SEGURA; JÚNIOR; SARTO; SCHMIDT; JÚNIOR; GABOV; FARDIM, 2015); e por outro lado, o mesmo foi observado para madeiras de eucalipto, que normalmente apresentam baixos teores de extrativos, mas foram apresentaram valores mais elevados, chegando a 8,8% (Segura, 2015).

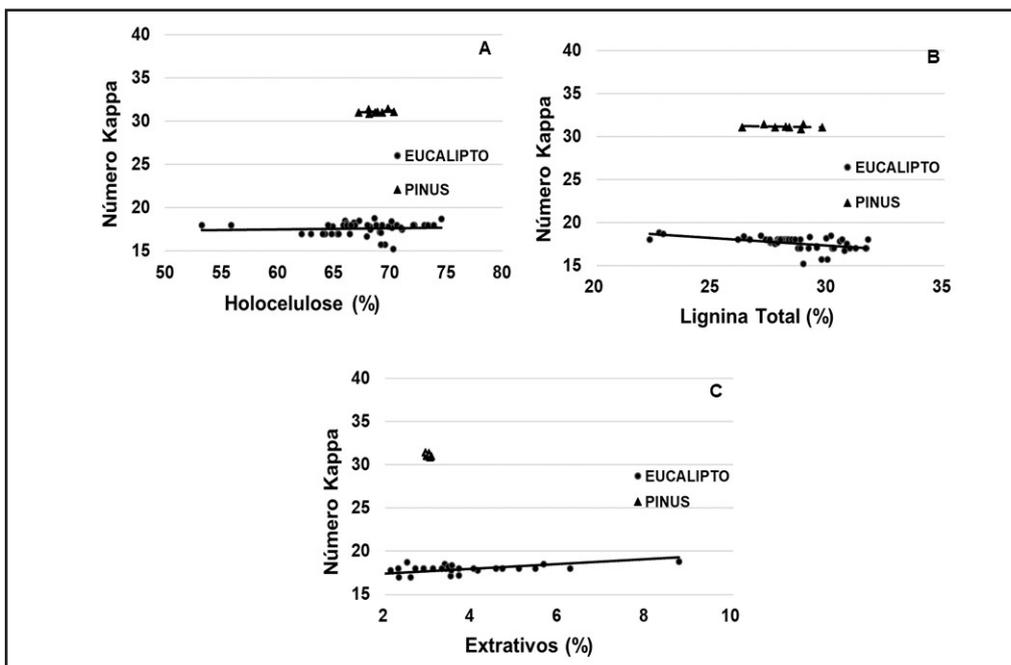
O número kappa da polpa não branqueada indica o grau de deslignificação imposto pelo processo de polpação e varia em função da madeira ou do produto que se deseja fabricar. Foi possível perceber uma relação clara entre o teor de holocelulose, teor de lignina total e teor de extrativos da madeira de eucalipto e pinus com o número kappa da polpa, em que independente da composição química da madeira, o número kappa ficou estável em 17,0-18,0 e 30,0-32,0, respectivamente (Figura 3A, Figura 3B e Figura 3C).

O número kappa objetivo das polpas de pinus (30-32) foi superior ao observado nas polpas de eucalipto (17-18), justamente para não comprometer de forma significativa o rendimento do processo e a viscosidade da polpa não branqueada, e por isso, é considerado um importante indicador de controle do processo de polpação.

Isso ocorre devido os cozimentos da madeira serem realizados com o número kappa objetivo, definido previamente, com base em um dado grau de deslignificação, independente da composição química da madeira e conseguido pela variação da carga alcalina e demais variáveis do processo, como tempo, temperatura e sulfidez.

O número kappa da polpa não branqueada não expressa somente a lignina residual após o cozimento, mas também, extrativos e ácidos hexenurônicos que constituem a polpa após o cozimento. Quanto maior o teor de extrativos da madeira, maiores as chances de extrativos na polpa não branqueada.

Figura 3 – Influência do número kappa do processo de polpação com a composição química das madeiras de eucalipto e pinus: teor de holocelulose (A); teor de lignina total (B) e teor de extrativos (C)



Fonte: Autores (2023)

Cardoso (2002) explica que madeiras com baixo teor de lignina necessitam de menor quantidade de álcali ativo para deslignificar em relação às madeiras com alto teor de lignina, para um mesmo número kappa da polpa não branqueada.

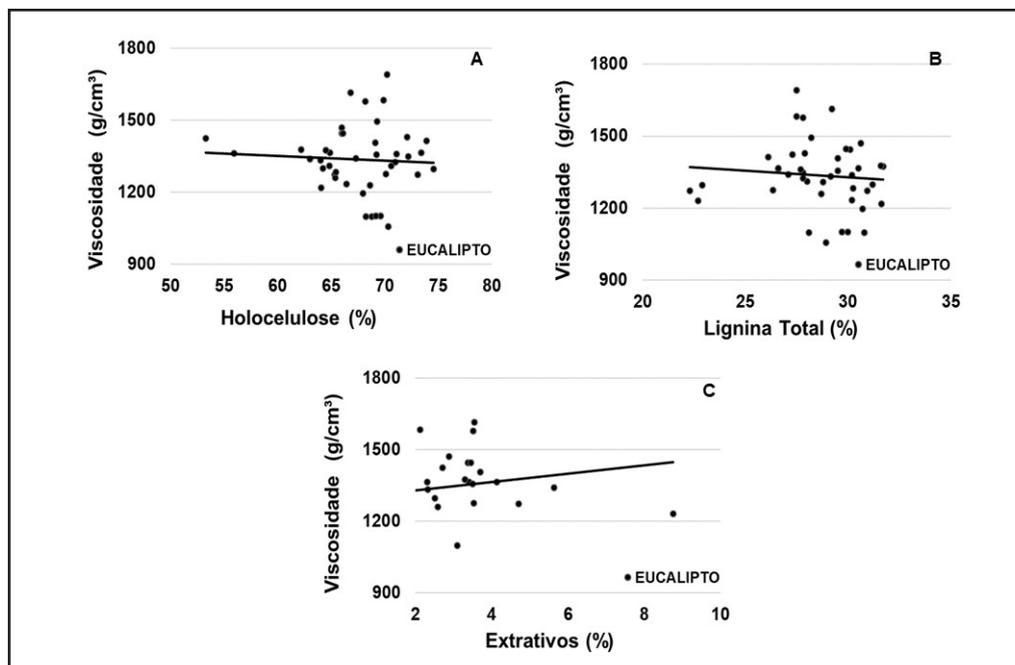
Com relação a viscosidade da polpa não branqueada, que é um indicador da degradação sofrida pelas fibras durante o processo de polpação, as polpas de eucalipto apresentaram uma tendência de decréscimo da viscosidade à medida que os teores de holoceluloses e de ligninas total da madeira aumentaram (Figura 4A e Figura 4B, respectivamente) e com a redução do teor de extrativos (Figura 4C). A variação da viscosidade foi de 1056 a 1690 cm<sup>3</sup>/g, para uma variação no teor de holocelulose entre 53,3 e 74,6%, para uma variação no teor de lignina entre 22,3 e 31,7% e para uma variação no teor de extrativos entre 2,1 e 8,8%.

Entretanto, a maioria dos valores de viscosidade se concentraram nos seguintes intervalos: de 1376 a 1412 cm<sup>3</sup>/g para uma variação de holocelulose entre 60 e 75%; de 1230 a 1690 cm<sup>3</sup>/g para uma variação de 26 a 31% de lignina; de 1099 a 1614 cm<sup>3</sup>/g para uma variação de 3,1 a 3,5% de teor de-extrativos.

A ligeira redução na viscosidade da polpa não branqueada pode ser explicada pelo aumento do teor de holocelulose da madeira, reflexo de uma maior presença das hemiceluloses, carboidratos de menor peso molecular; e pelo decréscimo do teor de lignina total da madeira, consequência de uma maior degradação das fibras (cadeias de celulose) causada pela necessidade de uma maior deslignificação da madeira, ou seja, maior uso de reagentes de cozimento e/ou condições do cozimento mais severas (tempo e temperatura).

Trugilho; Bianchi; Gomide e Schuchardt (2004) avaliaram as características da madeira em 15 clones de *Eucalyptus spp.*, bem como seus desempenhos nos processos de produção de polpa Kraft e encontrou clones com essa relação inversa entre viscosidade e teor de holocelulose. Alguns clones que apresentaram os maiores teores de holocelulose 82,0% e 80,9%, também apresentaram as menores viscosidades 1149 e 1177 cm<sup>3</sup>/g, respectivamente.

Figura 4 – Influência da viscosidade do processo de polpação com a composição química das madeiras de eucalipto e pinus: teor de holocelulose (A); teor de lignina total (B) e teor de extrativos (C)



Fonte: Autores (2023)

Almeida e Silva (2001) salientaram que o teor de extrativos presentes na madeira influencia diretamente no maior consumo de álcali. Logo, uma maior exigência da quantidade de álcali implica numa maior degradação dos carboidratos, que pode causar queda da viscosidade, diferente do que foi observado neste estudo.

Por fim, não foram encontrados nas literaturas consultadas para essa pesquisa resultados relacionando a viscosidades das polpas celulósicas de pinus com os teores de holocelulose, ligninas totais e extrativos da madeira.

### 3.4 Influências dos parâmetros do processo de polpação na qualidade da polpa não branqueada

Os parâmetros de polpação são definidos em função da qualidade da polpa não branqueada que se deseja para atender as especificações de um determinado produto. As informações sobre as madeiras de eucalipto provenientes dos materiais

científicos utilizados neste estudo para comparação dos parâmetros do processo de polpação indicaram, em sua maioria, tempos de cozimento de 140, 150 e 235 minutos, sulfidez de 30% e álcali ativo de 17%, 19,6% e 21%.

A partir destes dados foi possível observar, que para madeira de eucalipto, o rendimento do cozimento foi maior quando utilizadas as condições extremas, ou seja, menor tempo total de cozimento (140 min) associado a menor carga de álcali ativo (17%); e maior tempo total de cozimento (235 minutos) associado com a maior carga de álcali (21%), conforme Figura 5A.

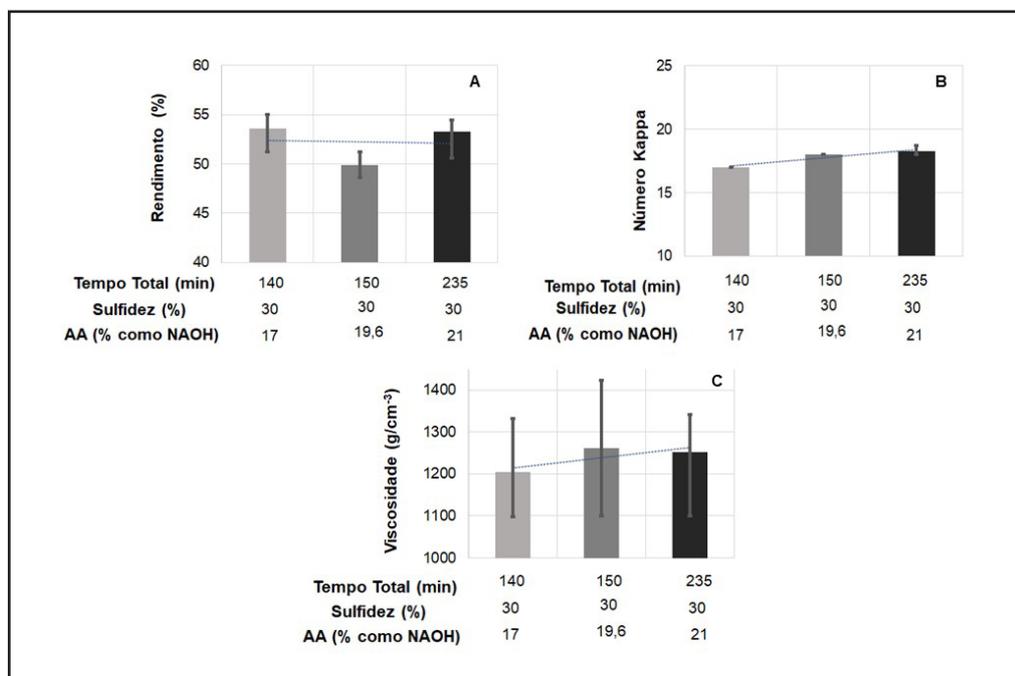
Demonstrando assim, que mesmo madeiras mais difíceis de serem deslignificadas quanto madeiras mais fáceis podem apresentar bons rendimentos desde que observadas essas condições previamente aos cozimentos. Por outro lado, o rendimento foi menor quando combinados tempo total de cozimento e carga alcalina intermediárias (150 minutos e 19,6%).

O número kappa foi praticamente fixo para todas as combinações de tempo e temperatura avaliados, em que variou no intervalo pequeno entre 17,0-18,7. No entanto, foi observado um menor número kappa (17,0) quando combinados o menor tempo de cozimento e a menor carga alcalina (140 minutos e 17%), conforme Figura 5B.

Isto aconteceu, pois, madeiras que exigem condições mais severas de cozimento, de modo a não prejudicar muito o rendimento, apresentaram número kappa levemente superior, o que auxilia também na viscosidade da polpa não branqueada. Por outro lado, as polpas mais fáceis de serem deslignificadas apresentaram menor carga de álcali e menor tempo de cozimento, e conseqüentemente, permitiram uma maior deslignificação a menores números kappa, com conseqüente menor viscosidade por esse maior nível de deslignificação.

Foi possível perceber e confirmar que a viscosidade da polpa não branqueada foi maior quando utilizada a condição de tempo total médio (150 minutos) e álcali ativo médio (19,6%) ou a condição de maior tempo total (235 minutos) e maior carga de álcali (21%), um reflexo da polpa de maior número kappa para manter um bom rendimento.

Figura 5 – Influência entre o rendimento de polpação (A), o número kappa (B) e a viscosidade (C) com os parâmetros de polpação (tempo total, sulfidez e álcali ativo) das madeiras de eucalipto



Fonte: Autores (2023)

Essa maior viscosidade em condição de maior tempo e carga alcalina sofre influência da maior remoção das hemiceluloses da polpa, uma vez que esses carboidratos são de menor peso molecular e solubilizados/degradados mais rapidamente no processo de polpação. Em contrapartida, a viscosidade foi menor quando associada ao menor tempo de cozimento e menor carga alcalina (140 minutos e 17%), conforme Figura 5C.

Assim, foi possível inferir que as características da polpa não branqueada que resultaram numa maior produtividade (rendimento) e qualidade (número kappa e viscosidade) foram obtidas por meio de combinações dos parâmetros do processo de polpação, ou seja, as alterações das variáveis tempo total de cozimento e carga alcalina proporcionam influência na produtividade e na qualidade da polpa.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com base nos mecanismos de pesquisa utilizados neste estudo, permitiram concluir que:

É preciso um maior investimento na realização de análises de qualidade da madeira para a avaliação do processo de polpação e qualidade da polpa celulósica, principalmente em trabalho que envolvem madeiras de pinus.

A densidade básica foi a característica da madeira mais apresentada nos trabalhos científicos, por apresentar boa correlação com o rendimento do processo;

O teor de extrativos e relação S/G da lignina foram as informações da madeira menos apresentadas nas pesquisas;

Foi perceptível a diferença na quantidade de estudos usando a madeira de pinus em relação ao eucalipto, sendo a grande maioria dos estudos focados em madeiras de eucalipto;

A sulfidez do processo foi uma variável praticamente fixa (30%), enquanto o tempo total e a carga alcalina variaram de acordo com a qualidade da madeira.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. M. e SILVA, D. J. Efeito da quantidade de extrativos e da acessibilidade do licor na polpação Kraft de clones de *Eucalyptus*. In: 34º Congresso Anual de Celulose e Papel. 22- 25 out.2001. São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABTCP, 2001.

ALVEZ, I. C. N. **Potencial da madeira do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage visando a produção de celulose kraft**. 2010. 13p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. A.; SILVA, V. L.; COLODETTE, J. L. Determinação da relação Siringila/Guaiacila da lignina em madeiras de eucalipto por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (PI-CG/EM). **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 8, p. 2035-2041. 2008.

CARDOSO, G. V. **Otimização do cozimento kraft para produção de celulose a partir de madeiras de *Eucalyptus globulus* com diferentes teores de lignina**. 2002. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DOS SANTOS, R.; DE MELLO JÚNIOR, J. A.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; PEREIRA, F. A. Polpação Kraft e Kraft/Aq da madeira pré-hidrolisada *Eucalyptus urophylla* x *grandis*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 4, p. 1281–1290, 2016.

DUARTE, F. A. S. **Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa celulósica Kraft**. 2007. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; COLODETTE, J. L.; LIMA, J. T.; DA SILVA, J. R. M.; GOMIDE, J. L. Avaliação da madeira e da polpação Kraft em clones de *Eucaliptos*. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1175-1185, 2009.

IBÁ – Indústria Brasileira de produtores de Árvores. Relatório IBÁ 2023 ano base 2022. Brasília: 2023. 46 p.

KOLLMANN, F.F.P. **Tecnología de la madera y sus aplicaciones**. Madrid. Tomo I. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. 647p. 1959.

MEDEIROS NETO, H. F. **Qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft**. 2012. 119p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 407-419, jul.-set., 2008.

MORAIS, P. H. D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade, e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa**. 2008. 65p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

PEREIRA, A. K. S.; LONGUE JÚNIOR, D.; MAFRA NETO, C. da S.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B. Determinação da composição química e potencial de polpação da madeira. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1490–1500, 2019.

PEREZ, J. F. R. **Avaliação de procedências de *Eucalyptus globulus* segundo a qualidade de sua madeira para a produção de celulose**. 2002. 128 128 93f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) -Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; DE OLIVEIRA, R. C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.28, n. 6, p. 901-909, nov./dez. 2004.

SANTOS, D. R. S. **Avaliação tecnológica de clones-elite de *Eucalyptus spp.*, crescendo no Estado de Goiás: qualidade do lenho para produção de polpa celulósica Kraft**. 2018. 165p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2018.

SEGURA, E. S. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada.** 2015. 198p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

SEGURA, E. S. S. **Avaliação das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* para produção de celulose kraft pelos processos convencional e Lo-Solids.** 2012. 99p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.

TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; GOMIDE, J. L.; SCHUCHARDT, U. Classificação de clones de *Eucalyptus sp* visando à produção de polpa celulósica. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 895–899, dez. 2004.

VIVIAN, M. A.; SEGURA, T. E. S.; JÚNIOR, E. A. B.; SARTO, C.; SCHMIDT, F.; JÚNIOR, F. G. S.; GABOV, K.; FARDIM, P. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para produção de polpa celulósica kraft. **Scientia Forestalis.**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 183-191, mar. 2015.

WEHR, T. F. A. **Variações nas características da madeira de *E. grandis* Hill ex maiden e suas influências na qualidade de cavacos em cozimento Kraft.** Piracicaba, 1991. 84p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

WENDEL, P. D. **Estudo da adição de xilanas na polpação kraft e seus impactos no desempenho do processo e qualidade do produto final.** 2014. 34p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

## Contribuição de Autoria

### 1 Rafaella Dias Ramos

Engenheira Florestal

<https://orcid.org/0009-0008-3257-2106> • ra.fadias@hotmail.com

Contribuição: Conceitualização; Pesquisa; Curadoria de dados; Administração do projeto

### 2 Dalton Longue Júnior

Engenheiro Florestal, Doutor em Ciências Florestais

<https://orcid.org/0000-0002-5149-3074> • dalton@uesb.edu.br

Contribuição: Supervisão; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Recebimento de financiamento; Análise de dados

### 3 Fernando José Borges Gomes

Engenheiro Florestal, Doutor em Ciências Florestais

<https://orcid.org/0000-0003-0363-4888> • fernandogomes@ufrjr.br

Contribuição: Supervisão; Validação de dados e experimentos; Design da apresentação de dados; Recebimento de financiamento; Análise de dados

### 4 Natielly Cristine

Engenheira Florestal

<https://orcid.org/0000-0002-3996-5702> • natiellymedeiros7@gmail.com

Contribuição: Curadoria de dados; Administração do projeto

### Como citar este artigo

RAMOS, R. D.; LONGUE JUNIOR, D.; GOMES, F. J. B.; MEDEIROS, N. C. G. Influência da densidade básica e da composição química da madeira para a indústria de polpa celulósica: um estudo de caso. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 34, n. 3, e85566, p. 1-21, 2024. DOI 10.5902/1980509885566. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509885566>. Acesso em: dia mês abreviado. ano.