

Influência da inclinação do tronco de *Eucalyptus saligna* na qualidade da produção de celulose.

Pedro Henrique de Moraes Kolton¹; Gabriel Valim Cardoso²; Laíse Vergara Nörnberg¹; Osmarino Pires dos Santos³; Franco Freitas Quevedo³; Rafael Beltrame¹

¹Centro de Desenvolvimento Tecnológico (CDTec), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS, Brasil; ²Centro de Engenharias (CEng), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS, Brasil; ³Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), CMPC Celulose Riograndense, Guaíba/RS, Brasil – phkolton@gmail.com

Resumo: Mudanças climáticas têm intensificado eventos extremos como tempestades, afetando severamente plantações de eucalipto no Brasil. O estudo analisou clones de *Eucalyptus saligna* afetados por vendavais, focando na densidade básica, composição química e rendimento na produção de celulose. As árvores foram classificadas em três grupos com base no ângulo de inclinação do tronco: sem inclinação (SI), inclinação moderada (IM) e inclinação severa (IS). Resultados mostraram que a densidade básica não variou significativamente entre SI e IM, mas o lenho de tração em IS teve densidade inferior ao lado oposto. A análise química revelou que a madeira com maior inclinação não apresentou menores teores de celulose, como esperado. O rendimento e o número kappa da celulose foram superiores para as árvores sem inclinação em comparação com as inclinadas. Esses resultados indicam que os danos causados pelo vento podem comprometer a qualidade e a eficiência da madeira para a produção de celulose.

Palavras-chave: Madeira de reação; Polpação Kraft; Impacto das tempestades.

Influence of *Eucalyptus saligna* trunk inclination on pulp quality

Abstract: Climate change has intensified extreme weather events such as storms, severely impacting eucalyptus plantations in Brazil. This study analyzed clones of *Eucalyptus saligna* affected by windstorms, focusing on basic density, chemical composition, and yield in cellulose production. Trees were classified into three groups based on trunk tilt angle: no tilt (SI), moderate tilt (IM), and severe tilt (IS). Results indicated that basic density did not significantly differ between SI and IM, but the reaction wood in IS had a lower density compared to the opposite side. Chemical analysis revealed that wood with greater tilt did not exhibit lower cellulose content as anticipated. The yield and kappa number of cellulose were higher for trees with no tilt compared to those with tilt. These findings suggest that wind-induced damage may compromise the quality and efficiency of wood for cellulose production.

Keywords: Reaction wood; Kraft pulping; Impact of storms.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas provocadas pelo homem estão aumentando a frequência de eventos climáticos extremos, como tempestades. Quando acompanhadas de ventos fortes, essas tempestades representam uma ameaça significativa para as plantações de árvores, podendo causar danos graves às florestas, como tortuosidade, tombamento e quebra das árvores. Esses estragos não apenas afetam a qualidade da madeira, mas também trazem prejuízos para a colheita, tornando mais difícil o corte das toras e a sua acomodação no transporte (Cardoso *et al.*, 2011).

De acordo com Moreschi (2012) e Barnett, *et al.* (2014) espécies expostas ao vento podem desenvolver lenho de reação, uma estrutura que altera o comportamento da madeira ao modificar o equilíbrio do tronco. Essa alteração pode reduzir a eficiência da madeira em processos industriais, especialmente na produção de polpa celulósica para papel. A variabilidade nas fibras e vasos do lenho de reação pode comprometer a qualidade da madeira de fustes inclinados. Os danos causados pelo vento nas florestas plantadas têm se agravado devido às mudanças climáticas. Portanto, é importante avaliar como esses danos influenciam a produção de celulose para estimar as possíveis perdas e adaptar as práticas de manejo florestal.

Essas variações causadas pelas tempestades podem impactar negativamente um dos pilares da economia do Rio Grande do Sul, visto que o estado possui mais de 600 mil hectares de florestas de eucalipto, sendo a maior área plantada dentre os estados do sul, que somados totalizam 18% da produção nacional (Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ, 2023).

Diante disto, este estudo visa caracterizar a densidade básica, a composição química e o rendimento na produção de celulose de clones de *Eucalyptus saligna* afetados por vendavais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção do material

O material utilizado no estudo pertence a plantios da empresa CMPC Celulose Riograndense Ltda., localizado em Arroio dos Ratos, RS. Foram selecionados clones

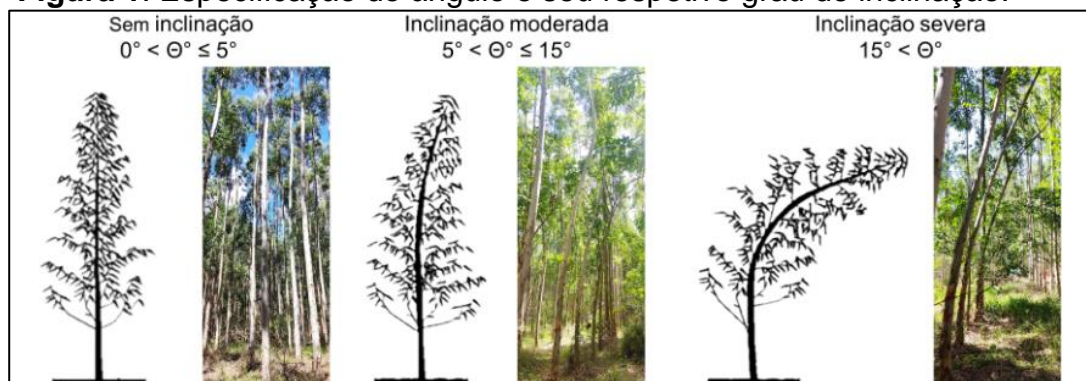
de *Eucalyptus saligna* que resistiram a uma tempestade, apresentando inclinação indesejada em seus fustes, o que é relevante para a análise da homogeneidade em monocultivos. As árvores afetadas tinham aproximadamente 9 anos de idade e foram divididas em três categorias de inclinação, conforme a metodologia a ser detalhada.

2.2 Identificação do ângulo de inclinação e coleta do material

A classificação das árvores foi baseada no ângulo de inclinação (Θ°) do fuste em relação ao solo, utilizando a metodologia adaptada de Boschetti (2015).

Sendo conhecidos os ângulos, as árvores foram classificadas da seguinte forma: ângulo entre 0° e 5° classificadas como sem inclinação (SI), ângulos entre 5° e 15° , inclinação moderada (IM), ângulo maior que 15° , inclinação severa (IS). Como expresso na Figura 1.

Figura 1. Especificação do ângulo e seu respectivo grau de inclinação.



Fonte: Autores, 2024.

Após identificar e classificar as árvores inclinadas, nove (9) foram selecionadas para abate e análises futuras: três (3) sem inclinação (SI), três (3) com inclinação moderada (IM) e três (3) com inclinação severa (IS).

2.3 Caracterização

2.3.1 Densidade básica

A análise da densidade básica seguiu o padrão da CMPC Celulose Riograndense Ltda., com a coleta de discos de 4 cm de espessura em posições ao longo da altura da árvore: DAP e 33%, 66% e 100% da altura comercial. Além disso,

foram retirados 4 toretes de aproximadamente 1,20 m por árvore das seções entre os discos. As amostras foram identificadas, descascadas e enviadas ao laboratório.

Para a análise da densidade utilizou-se método da balança hidrostática de acordo com a norma SCAN-CM 43:95 (1995), descrita a seguir, identificou-se o lado de cada disco com lenho de tração e o lado oposto, confeccionando duas cunhas para cada lado antagônico ao eixo da madeira. As cunhas foram saturadas a 4,5 kgf/cm² por 24 horas, pesadas submersas (peso úmido imerso - PUI) e depois de forma convencional (peso úmido amostral - PUA). Com esses valores, o volume da amostra foi calculado usando a equação 1.

$$V = PUA - PUI \quad (1)$$

Onde, V = Volume (cm³); PUA = Massa do material saturado (g); PUI = Massa do material imerso (g).

Por fim as amostras são levadas a uma estufa a 105 ± 5 graus por 5 dias, para se obter o peso seco e, dessa forma, calcular a densidade de acordo com a equação 2.

$$\phi = (m / V) * (1000) \quad (2)$$

Onde, ϕ = Densidade (Kg / m³); m = Massa (g); V = Volume (cm³)

2.3.2 Caracterização química

A análise química da madeira começou com o processamento dos toretes em cavacos com um picador de disco, seguidos pela mistura uniforme em uma betoneira. Os cavacos foram secos em estufa solar a $35 \pm 3^\circ\text{C}$ por 5 dias e armazenados em sacos plásticos herméticos. A preparação dos cavacos seguiu a norma TAPPI T 264 cm-07, conforme descrito na Tabela 1. Não houve separação entre lenhos de tração e o oposto.

Tabela 1. Metodologias para caracterização química da madeira.

Análises química da madeira	Metodologia
Teor de extrativos em acetona	TAPPI T 204 cm-07 (2007)
Teor de extrativos em água quente	TAPPI T 207 cm-08 (2008)
Teor de cinzas	TAPPI T 211 om-12 (2012)
Teor de lignina solúvel e insolúvel em ácido	TAPPI T 222 om-11 (2011)

2.3.3 Polpação

Para o processo de polpação, foram combinados cavacos de três espécimes SI, três com IM e três com IS para realizar o cozimento Kraft convencional no laboratório de Celulose e Papel da Universidade Federal de Pelotas. As condições do cozimento foram: temperatura do processo de 158°C; álcali ativo de 22%; sulfidez de 30% e o tempo total de três (3) horas. Após o cozimento, as amostras foram submetidas ao teste para identificar o número kappa (TAPPI T 236 cm-85), utilizado para avaliar a qualidade da celulose produzida.

2.3.3 Análise estatística

Para avaliar as diferenças entre médias dos grupos, foi realizada uma ANOVA de um fator com 5% de significância. Se a ANOVA mostrasse diferenças significativas ($p < 0,05$), o teste de Tukey foi utilizado para identificar pares específicos com diferenças.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados referentes à caracterização química das madeiras de *Eucalyptus saligna* afetadas pela ação do vento estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características químicas dos clones de *E. saligna* afetados pela ação do vento.

Grupo amostral	Teor de extrativos em acetona (%)	Teor de extrativos em água quente (%)	Teor de extrativos totais (%)	Teor de cinzas (%)	Teor de lignina insolúvel (%)	Teor de lignina solúvel (%)	Teor de lignina total (%)
SI	1,023a	1,347a	2,370a	0,223a	25,53a	3,433ab	28,96a
IM	1,317a	1,583a	2,897a	0,277a	26,47a	3,510a	29,98b
IS	1,657a	1,797a	3,453a	0,280a	25,91a	3,207a	29,11ab

Em que: SI = sem inclinação; IM = inclinação moderada; IS = inclinação severa. Médias seguidas de mesma letra minúscula, na vertical, para cada característica, não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Na caracterização química, os únicos valores com variação estatística significativa foram os de lignina solúvel e total. A madeira de tração está associada a um aumento da celulose, enquanto a lignina é praticamente inexistente na camada gelatinosa (Mikshina *et al.*, 2015). As análises químicas mostraram que a camada

gelatinosa é composta quase inteiramente por celulose, podendo conter outros polissacarídeos como pectina e hemicelulose, mas sem lignina (Bowling *et al.*, 2008).

Embora se esperasse mais celulose em madeiras com maior inclinação devido à redução da lignina, os dados não confirmaram essa hipótese. Sultana *et al.* (2010) encontraram menor teor de lignina no lenho de reação comparado ao de tração em nove espécies de angiospermas. A madeira com inclinação severa teve valores semelhantes à madeira sem inclinação, mas inferiores àquela com inclinação moderada, sugerindo variações nas características dos tipos de lenho normal, oposto e de reação.

Tabela 3. Características químicas dos clones de *E. saligna* afetados pela ação do vento.

Grupo amostral	Densidade básica SI (kg/m ³)	Densidade básica IM (kg/m ³)	Densidade básica IS (kg/m ³)
Lado oposto	505,23a	502,96a	512,61a
Lado da tração	480,60a	466,33a	461,92b

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Ao comparar os diferentes lenhos de uma mesma árvore, observado na Tabela 3, observou-se que, para madeiras sem inclinação (SI) e com inclinação moderada (IM), não houve diferença significativa na densidade. No entanto, para a inclinação severa (IS), o lenho de tração teve densidade inferior ao lado oposto. Estudos como Chauhan e Walker (2011) encontraram densidades de 380 kg/m³ para o lenho oposto e 550 kg/m³ para o lenho de tração em *Eucalyptus regnans* (1 ano), e Sousa (2004) encontrou 470 kg/m³ e 570 kg/m³ para *Eucalyptus grandis* (4,5 anos).

Resultados semelhantes foram encontrados para *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (Boschetti *et al.*, 2017). Em *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pilularis* e *Eucalyptus urophylla* (32 anos), a madeira tracionada foi 2%, 4% e 1,6% menos densa, respectivamente, enquanto Monteiro *et al.* (2010) observaram uma densidade 1,6% superior na madeira tracionada de *Eucalyptus maculata*. A discrepância de densidade pode ser atribuída à idade das árvores (Boschetti, 2020).

Tabela 4 - Rendimentos, número kappa e consumo de madeira na polpação kraft.

Tratamentos	RT (%)	TR (%)	RD (%)	N° kappa	CEM (m ³ /tsa)
SI	53,6	0,1	53,5	19,2	3,46
IM	49,3	0,4	48,9	23,9	3,86
IS	49,4	0,2	49,2	23,7	3,78

Em que: SI = sem inclinação; IM = inclinação moderada; IS = inclinação severa; RT = rendimento total; TR = teor de rejeitos; RD = rendimento depurado; CEM = consumo específico de madeira.

Ao analisar Tabela 4, observou-se uma redução no rendimento para árvores com inclinação moderada (IM) e severa (IS) em comparação com árvores sem inclinação (SI). Um número kappa mais baixo indica melhor qualidade da celulose branqueada. Ferreira *et al.* (1997) relataram um rendimento de 51,93% e um número kappa de 15,7 para *Eucalyptus saligna* de 6 anos, enquanto Fernandes (2022) encontrou 53,06% de rendimento e 17,7 para árvores da mesma idade. Esperava-se um rendimento superior em madeiras mais inclinadas devido à maior concentração de holocelulose e hemiceluloses, como xilanas (Aguayo *et al.*, 2012).

4. CONCLUSÃO

Pode concluir-se com a realização deste trabalho que:

- No que tange a parte química, não houve diferença significativa entre a maioria das características estudadas, com exceção dos teores de lignina solúvel e total;
- Valores de densidade básica só foram distintos quando comparados o lenho de reação e o lenho oposto das amostras que apresentaram inclinação severa;
- O rendimento e N° kappa das árvores sem inclinação foram superiores aos das árvores com inclinação moderada e severa.

5. REFERÊNCIAS

AGUAYO, M. G. *et al.* Chemical characteristics and Kraft pulping of tension wood from *Eucalyptus globulus* labill. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1163-1172, 2012.

BARNETT, J. R.; GRIL, J.; SARANPÄÄ, P. The Biology of Reaction Wood Introduction. **The Biology of Reaction Wood**, pp.1 - 11, 2014.

BOWLING, A. J.; VAUGHN, K. C. Immunocytochemical characterization of tension wood: gelatinous fibers contain more than just cellulose. **American journal of botany**, v. 95, n. 6, p. 655-663, 2008.

BOSCHETTI, W. T. N. *et al.* Quality of reaction wood in *Eucalyptus* trees tilted by wind for pulp production. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 3, p. 291-297, 2017.

BOSCHETTI, W. T. N.; VIDAURRE, G. B.; PAES, J. B. Ocorrência e propriedades da madeira de reação em eucalipto. In: **VIDAURRE, Graziela Baptista; MISSIA DA SILVA, João Gabriel; MOUILIN, Jordão Cabral; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira (orgs.)** *Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil*. Vitória: EDUFES, 2020. p. 47-69.

BOSCHETTI, W. T. N. *et al.* Parâmetros dendrométricos e excentricidade da medula em árvores inclinadas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 781-789, 2015.

CARDOSO, A. L. *et al.* Danos provocados por ventos em florestas de eucalipto em diferentes altitudes e as implicações para a colheita florestal. **XV Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**. Paraíba, 2011.

CHAUHAN, S.S.; WALKER, J.C. Wood quality in artificially inclined 1-year-old trees of *Eucalyptus regnans*—differences in tension wood and opposite wood properties. **Canadian journal of forest research**, 2011, 41(5), pp.930-937.

FERNANDES, M. A. M. **Análise da qualidade da madeira de híbridos de *Corymbia* para a produção de celulose kraft**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

FERREIRA, G W. *et al.* Qualidade da celulose kraft-antraquinona de *Eucalyptus dunnii* plantado em cinco espaçamentos em relação ao *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. **Ciência Florestal**, v. 7, p. 41-63, 1997.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2023. São Paulo: **IBÁ**, 2023.

MIKSHINA, P. V. *et al.* Physicochemical properties of complex rhamnogalacturonan I from gelatinous cell walls of flax fibers. **Carbohydrate polymers**, v. 117, p. 853-861, 2015.

MONTEIRO, T. C.; SILVA, R. V.; LIMA, J. T.; BARAÚNA, E. E. P.; CARVALHO, 1981. D. M.; LIMA, M. T. Influência do lenho de tração nas propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus* sp. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 1, n. 2, p. 6-11, 2010.

MORESCHI, J. C. Propriedades da madeira. 4. ed. Curitiba: Setor de Ciências Agrárias da UFPR, Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 2012.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD. **SCAN-CM 43:95**. Basic density, SCAN, 1995. 4 p.

SOUSA, L. C. **Caracterização da madeira de tração em *Eucalyptus grandis* e sua influência na produção de polpa celulósica**. 2004. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

SULTANA, R. S.; ISHIGURI, F.; YOKOTA, S.; IIZUKA, K.; HIRAIWA, T.; YOSHIZAWA, N. Wood Anatomy of nine Japanese Hardwood species forming reaction wood without gelatinous fibers, **IAWA Journal**, v. 31, n. 2, p. 191-202. 2010.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 204 cm-07: Solvent extractives of wood and Pulp**. Atlanta: Tappi Technology Park, 2007.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 207 cm-08: Water solubility of wood and Pulp**. Atlanta: Tappi Technology Park, 2008.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 211**

om-12: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta: Tappi Technology Park, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 222 om-11: Acid-insoluble lignin in wood and pulp.** Atlanta: Tappi Technology Park, 2011.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI, T 236 cm-85: Kappa number of pulp.** Atlanta: Tappi Technology Park, 1985.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 257 sp-12: Sampling and preparing wood for analysis.** Atlanta: Tappi Technology Park, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 264 cm-07: Preparation of wood for chemical analysis.** Atlanta: Tappi Technology Park, 2007.