

Aspectos físico-químico-anatômicos da madeira de Liquidâmbar visando à produção de polpa e papel

Physico-chemical-anatomical aspects of Liquidâmbar wood for the pulp and paper production

Magnos Alan Vivian *¹ (ORCID 0000-0001-7793-8425), Amanda Fernandes de Castro ¹(ORCID 0000-0002-7610-1866), Karina Soares Modes ¹ (ORCID 0000-0002-2249-2873), Wesley Wilker Corrêa Morais ²(ORCID 0000-0002-9854-5740), Francides Gomes da Silva Júnior ³ (ORCID 0000-0002-9142-7442)

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, SC, Brasil. *Autor para correspondência: magnos.alan@ufsc.br

²Universidade Estadual de Roraima, Rorainópolis, RR, Brasil.

³Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.

Submissão: 19/04/2023 | Aceite: 23/06/2023

RESUMO

O setor de celulose e papel tem notável destaque na economia brasileira, contribuindo significativamente com a balança comercial, geração de empregos e investimentos. Atualmente o setor utiliza basicamente a madeira de dois gêneros para produção de polpa para os segmentos de fibra curta e fibra longa, o *Eucalyptus* e o *Pinus*, respectivamente. Entretanto, é fundamental estudar novas matérias-primas, que possam surgir como alternativa a estas já consolidadas. Neste sentido, tem-se por objetivo avaliar as propriedades da madeira de *Liquidambar styraciflua* para produção de polpa celulósica e papel. Para isso, foram utilizadas cinco árvores, com 7 anos de idade, das quais extraíram-se discos ao longo do fuste para avaliação da densidade básica, composição química e morfologia das fibras da madeira. Os valores de densidade básica média e ponderada obtidos para a madeira de *L. styraciflua* foram de 0,482 e 0,484 g/cm³, respectivamente, o que permitiu classificá-la como de média densidade, valor próximo ao de outras espécies de folhosas utilizadas para produção de celulose. Em relação à composição química foram observados baixos teores de cinzas (0,29%) e lignina (24,71%), e altos teores de holocelulose (70,88%) e extrativos (4,40%). Quanto à caracterização morfológica das fibras observaram-se os valores médios de comprimento de 1,82 mm, largura de 27,84 µm, diâmetro do lúmen de 16,10 µm e espessura da parede de 5,87 µm. Além disso, foram obtidos os valores médios de 42,60%, 57,40%, 0,77 e 65,22 para os parâmetros de fração parede, coeficiente de flexibilidade, índice de Runkel e índice de enfeltamento, respectivamente. De maneira geral, com base nas características físico-químico-anatômicas obtidas para a madeira de *L. styraciflua*, conclui-se que a mesma apresenta aptidão para a produção de polpa celulósica e papel.

PALAVRAS-CHAVE: *Liquidambar styraciflua*; qualidade da madeira; composição química; celulose de fibra curta.

ABSTRACT

The pulp and paper sector has a notable highlight in the Brazilian economy, contributing significantly to the trade balance, job creation and investments. Currently, the sector basically uses wood from two genus to produce pulp for the short fiber and long fiber segments, *Eucalyptus* and *Pinus*, respectively. However, it's essential to study new raw materials, which may arise as an alternative to those already consolidated. In this sense, the objective is to evaluate the properties of *Liquidambar styraciflua* wood for the pulp and paper production. For this, five 7-year-old trees were used, from which discs were extracted along the trunk to evaluate the basic density, chemical composition and morphology of the wood fibers. The mean and weighted basic density values obtained for *L. styraciflua* wood were 0.482 and 0.484 g/cm³, respectively, which allowed classifying it as medium density, a value close to that of other hardwood species used for pulp production. Regarding the chemical composition, low levels of ash (0.29%) and lignin (24.71%) and high levels of holocellulose (70.88%) and extractives (4.40%) were observed. As for the morphological characterization of the fibers, the mean values of length of 1.82 mm, width of 27.84 µm, lumen diameter of 16.10 µm and wall thickness of 5.87 µm were observed. In addition, mean values of 42.60%, 57.40%, 0.77 and 65.22 were obtained for the parameters of wall fraction, flexibility coefficient, Runkel index and felting index, respectively. In general, based on the physical-chemical-anatomical characteristics obtained for the *L. styraciflua* wood, it's concluded that it has aptitude for the pulp and paper production.

KEYWORDS: *Liquidambar styraciflua*; wood quality; chemical composition; short fiber pulp.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com grande potencial para produção florestal, o qual conta com uma área plantada de 9,93 milhões de hectares para fins industriais, com destaque para os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* (IBÁ 2022). Do total da área plantada, o *Eucalyptus* ocupa aproximadamente 75,8% (7,53 milhões de hectares), seguido pelo *Pinus* 19,4% (1,93 milhões de hectares) e outras espécies com 4,8% (0,47 milhões de hectares) (IBÁ 2022).

O destaque obtido pelos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil se dá pela ótima adaptação e alta produtividade, que apresentam uma média nacional, conforme o relatório anual do IBÁ (2022), de 38,9 e 29,7 m³/ha/ano, respectivamente. Esses valores levam em consideração os dados das empresas associadas, com produção em sítios bons e ruins, assim os valores podem variar para mais ou menos para ambos os gêneros.

Já à espécie *L. styraciflua*, objeto do presente estudo, que é uma folhosa, pertencente à família Hamamelidaceae, originária da América do Norte e América Central (KORMANIK 1990, LORENZI et al. 2003), pode apresentar produtividade variando de 18,7 m³/ha/ano aos 12 anos, em solos de baixa fertilidade (CARVALHO 1998), a 40 m³/ha/ano aos 11 anos (SHIMIZU & SPIR 2004). Desta forma, dependendo das condições edafoclimáticas, o *L. styraciflua* pode apresentar crescimento e produtividade semelhante aos gêneros mais plantados do país.

Levando em consideração que o Brasil é, de acordo com o IBÁ (2022), o segundo maior produtor mundial de celulose (com 22,5 milhões de toneladas) e o décimo de papel (com 10,7 milhões de toneladas), focado basicamente no gênero *Eucalyptus* para produção de polpa para o segmento de fibra curta, e do gênero *Pinus* para o segmento de fibra longa, é essencial a avaliação de novas espécies, que possam servir como alternativa ou complemento para o setor. Isso se justifica pela busca constante de aperfeiçoamento e avanço no setor de celulose e papel, bem como pela possibilidade de produzir papéis com características diferenciadas, além de evitar que a cadeia produtiva fique restrita a poucas espécies, o que eleva o risco de ataque de pragas e doenças.

Nessa linha pode-se enquadrar a espécie *L. styraciflua*, que conforme o Laboratório de Produtos Florestais, do Serviço Florestal Americano (FOREST PRODUCTS LABORATORY 2010), apresenta madeira com potencial madeireiro para diversas finalidades, entre elas destacam-se: madeira serrada (*lumber*) e laminada (*veneer*), compensados (*plywood*), dormentes (*railroad crossties*), caixas (*boxes*), móveis (*furniture*), molduras (*moulding*) e a polpa celulósica (*pulpwood*). No entanto, apesar da espécie ser considerada promissora para manejo florestal no Sul do Brasil, ainda são raras as informações disponíveis na literatura sobre o seu potencial para a produção de polpa celulósica.

De acordo com pesquisadores (ROSA 2003, VIVIAN et al. 2021), quando se busca avaliar a aptidão de determinada espécie para produção de polpa e papel, as principais características da madeira que afetam tal uso são a densidade, a composição química e a morfologia de suas fibras, desta forma o objetivo do presente estudo é determinar tais propriedades, visando a produção de polpa celulósica.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção do material

Para a realização do presente estudo, utilizou-se a madeira de *Liquidambar styraciflua* L., com 7 anos de idade, proveniente de um plantio experimental realizado na Área Experimental Florestal (AEF), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), localizada em Curitiba/SC. A área está situada a uma altitude de 987 metros acima do nível do mar, com clima, conforme a classificação de Köppen, do tipo Cfb - subtropical úmido, com verões amenos (EMBRAPA 2012).

O povoamento de *L. styraciflua* foi implantado no ano de 2011 em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em uma área de 1,3 ha, com espaçamento inicial de 2,5 x 2,5 m, sendo realizado um desbaste seletivo no ano de 2018, ocasião no qual se deu a coleta das árvores avaliadas, onde foram removidos aproximadamente 50% dos indivíduos.

Foram selecionadas cinco árvores com diâmetros e alturas semelhantes e delas retirados discos de aproximadamente 3,0 cm de espessura das seguintes posições: 0 (base), DAP (diâmetro à altura do peito = 1,30 m), 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (diâmetro de 6,0 cm). Foram coletados dois discos da base, sendo um utilizado para análise morfológica das fibras no sentido medula-casca, e o outro, juntamente com os discos das demais posições, foram utilizados para determinação da composição química e da densidade básica e sua variação longitudinal ao longo do fuste.

Os parâmetros dendrométricos médios das árvores coletadas foram: 16,2 cm de DAP e 7,11 m de

altura comercial. Após a coleta o material foi transportado para o Laboratório de Recursos Florestais, da Universidade Federal de Santa Catarina, para condução das demais etapas do estudo.

Densidade básica

Para determinação da densidade básica foram utilizados os discos retirados nas posições: 0, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial de cada árvore, dos quais confeccionou-se duas cunhas diametricamente opostas, que foram mantidas submersas em água até a completa saturação. Em seguida determinou-se o volume saturado das cunhas (cm³), de acordo com as recomendações da norma NBR 11.941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 2003). Na sequência as cunhas foram submetidas a secagem a temperatura de 103 ± 2 °C em estufa com circulação forçada de ar, para obtenção da massa seca (g). A partir dos valores de massa seca e volume saturado, determinou-se a densidade básica (Equação 1).

$$Db = \frac{Ms}{Vs} \quad (1)$$

Em que: Db = densidade básica (g/cm³); Ms = massa seca (g); Vs = volume saturado (cm³).

Após a obtenção dos valores de densidade básica em cada posição longitudinal (através da média das duas cunhas), calculou-se a densidade básica ponderada, utilizando os diâmetros dos discos nas diferentes alturas e sua densidade básica, conforme a Equação 2, apresentada por VIVIAN et al. (2021).

$$Dbp = \frac{1}{2} \frac{(D_B^2 + D_{DAP}^2) * (d_B + d_{DAP}) * \dots * (D_{75\%}^2 + D_{100\%}^2) + (d_{75\%} + d_{100\%})}{D_B^2 + D_{100\%}^2 + 2 * (D_{DAP}^2 + D_{25\%}^2 + D_{50\%}^2 + D_{75\%}^2)} \quad (2)$$

Em que: Dbp = densidade básica ponderada (g/cm³); D_B, D_{DAP}, D_{25%}, D_{50%}, D_{75%} e D_{100%} = diâmetros dos discos nas posições de amostragem (cm); d_B, d_{DAP}, d_{25%}, d_{50%}, d_{75%}, e d_{100%} = densidade básica dos discos em diferentes alturas (g/cm³).

Composição química

A composição química foi determinada a partir das amostras sobressalentes dos discos de todas as posições coletadas, que foram transformados em cavacos, formando uma única amostra composta das cinco árvores. Após esta etapa os cavacos foram transformados em serragem utilizando um moinho do tipo Willey, que foi classificada em peneiras vibratórias, selecionando-se a fração que ficou retida entre 40 e 60 *mesh*, ou seja, a serragem que passou na peneira de 40 *mesh* e ficou retida na de 60 *mesh*.

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Química, Celulose e Energia (LQCE), da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), localizado em Piracicaba/SP. Foram determinados os seguintes parâmetros, em triplicata: cinzas (TAPPI T 211 om-02) (TAPPI 2002), extrativos totais (TAPPI T 204 cm-97) (TAPPI 1997), e lignina (conforme a metodologia adaptada pelo LQCE/ESALQ/USP) (VIVIAN 2015). O teor de holocelulose (celulose + hemicelulose) foi obtido por diferença, conforme Equação 3.

$$HC = 100 - (TE + TL) \quad (3)$$

Em que: HC = teor de holocelulose (%); TE = teor de extrativos totais (%); TL = teor de lignina (%).

Morfologia das fibras e indicadores anatômicos

Para análise da morfologia das fibras e seus indicadores anatômicos utilizou-se os discos da base (0%), que foram previamente lixados, para na sequência confeccionar-se as baguetas radiais no sentido medula-casca, das quais foram retiradas amostras nas posições de 0, 50, e 100% (sendo 0% próximo a medula e 100% próximo a casca). Tais amostras foram transformadas em pequenos palitos (fragmentos) para a realização da maceração.

A maceração foi conduzida em tubos de ensaio com adição de ácido acético, ácido nítrico e água, na proporção 5:2:1, em banho-maria com temperatura de 100°C, por aproximadamente 1 hora, até individualização das fibras. Após isso, as amostras foram lavadas e mantidas em tubos de ensaio com água destilada (VIVIAN et al. 2022).

Com o material macerado foram montadas lâminas temporárias, adicionando-se 1 gota de safranina, 1 gota de glicerina e 1 gota de água, para obtenção de imagens das fibras em microscópio com câmera digital acoplada e software específico. Para captura das imagens de comprimento utilizou-se o aumento de 40x, já para largura e diâmetro do lúmen foi utilizado o aumento de 400x. Na sequência, com auxílio de software específico foram mensuradas as dimensões de 35 fibras para comprimento (C), largura (L) e diâmetro do lúmen (DL) para cada posição radial avaliada, totalizando 525 medições (5 árvores x 3 posições x 35 repetições), baseando-se nas recomendações da Association of Wood Anatomists (IAWA 1989). A partir destes foram calculados os demais indicadores anatômicos (espessura da parede celular, fração parede, coeficiente de flexibilidade, índice de enfeltramento e índice de Runkel), de acordo com as

Equações 4, 5, 6, 7 e 8.

$$E = \left(\frac{L-DL}{2}\right) \quad (4) \quad FP = \left(\frac{2E}{L}\right) \cdot 100 \quad (5) \quad CF = \left(\frac{DL}{L}\right) \cdot 100 \quad (6) \quad IE = \left(\frac{C}{\frac{L}{1000}}\right) \quad (7) \quad IR = \left(\frac{2E}{DL}\right) \quad (8)$$

Em que: E = espessura da parede celular (μm); L = largura da fibra (μm); DL = diâmetro do lúmen (μm); FP = fração parede (%); CF = coeficiente de flexibilidade (%); IE = índice de enfiamento; C = comprimento da fibra (mm); IR = índice de Runkel.

Análise dos dados

Os dados obtidos foram analisados com software estatístico R Studio. Os valores de densidade básica foram avaliados no sentido longitudinal base-topo das árvores, já a morfologia das fibras foi avaliada no sentido radial medula-casca. Para ambos se aplicou a análise de variância (ANOVA) e quando observada significância o teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade. Para a composição química realizou-se somente a análise estatística descritiva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade básica

Na Figura 1 é possível observar a valor médio (D_b) e ponderado (D_p), bem como a variação longitudinal no fuste, da densidade básica da madeira de *L. styraciflua*.

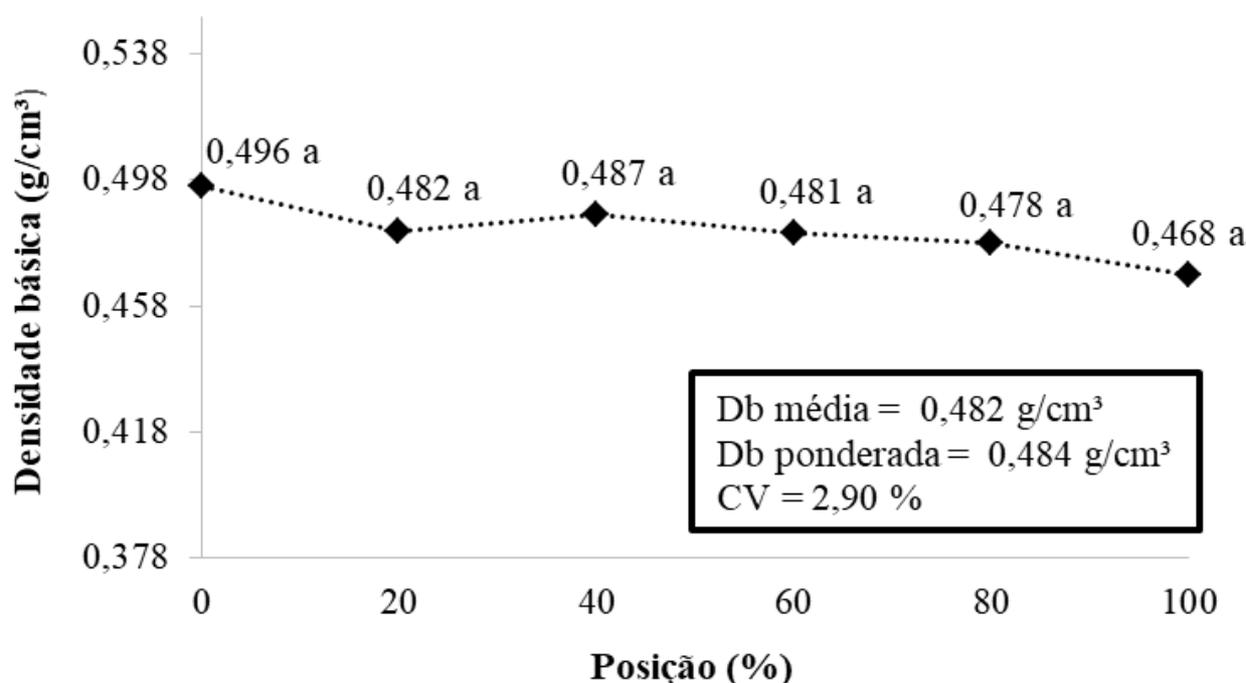


Figura 1. Densidade básica da madeira de *L. styraciflua*.

Figure 1. Basic density of *L. styraciflua* wood.

A madeira de *L. styraciflua*, com 7 anos de idade, apresentou densidade básica média e ponderada de 0,482 e 0,484 g/cm³, respectivamente. Com base nesses valores é possível classificar a madeira de *L. styraciflua* como de média densidade (densidade básica entre 0,40 e 0,75 g/cm³), conforme classificação proposta pela International Association of Wood Anatomists (IAWA 1989). Não foi observada diferença estatística significativa, ao nível de 5% de probabilidade, da densidade ao longo do fuste das árvores, indicando que a mesma tem homogeneidade para tal parâmetro. Essa homogeneidade é interessante, pois possibilita o aproveitamento de todo o tronco, mantendo suas características.

De acordo com a literatura, a faixa ideal de densidade básica para produção de polpa celulósica é entre 0,40 e 0,60 g/cm³ (BURGER & RICHTER 1991), assim a madeira de *L. styraciflua* enquadra-se neste intervalo. A densidade é um parâmetro fundamental dentro de uma fábrica de celulose, pois afeta desde a picagem das toras, até a impregnação e cozimento dos cavacos, refletindo diretamente no rendimento e consumo específico de madeira. De forma geral, madeiras de baixa densidade são mais fáceis de picar, impregnar e cozinhar, porém apresentam menor rendimento em massa de polpa celulósica por cozimento (SEGURA 2015, VIVIAN et al. 2020).

Na Tabela 1 pode ser observada a comparação da densidade básica da madeira de *L. styraciflua* com outras árvores da mesma espécie, porém de diferentes idades e procedências, bem como com espécies/híbridos do gênero de *Eucalyptus*.

Tabela 1. Comparação da densidade da madeira de *L. styraciflua* com outras espécies.

Table 1. Comparison of wood density of *L. styraciflua* with other species.

Espécie	Idade (anos)	Procedência	Densidade (g/cm ³)
<i>L. styraciflua</i> ¹	7	SC	0,484
<i>L. styraciflua</i> ²	8	ES	0,490
<i>L. styraciflua</i> ³	16	PR	0,519
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁴	5	PR	0,447
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁵	7	SP	0,499

Fonte: ¹presente estudo; ²FREITAS et al. (2017); ³MATTOS et al. (2001); ⁴VIVIAN et al. (2017); ⁵ALMEIDA (2003).

Comparando o valor de densidade básica obtido no presente estudo para a madeira de *L. styraciflua*, com sete anos, à árvores com idades diferentes, a mesma se assemelha com o valor citado por FREITAS et al. (2017), aos oito anos, porém é inferior ao citado por MATTOS et al. (2001), aos 16 anos, ficando claro o efeito da idade nesta propriedade.

Quando comparada com madeiras de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, que estão entre as matérias-primas mais utilizadas para produção de celulose de fibra curta no Brasil, a madeira de *L. styraciflua* apresenta-se similar, com valor intermediário entre os citados pelos autores na Tabela 1. Essa similaridade de densidade com as madeiras de *Eucalyptus* é benéfica, pois as fábricas já estão adaptadas a trabalhar com tais parâmetros, o que facilitaria o uso da espécie em questão.

Composição química

Na Figura 2 observam-se os valores médios da composição química da madeira de *L. styraciflua*, com os coeficientes de variação entre parênteses. Os teores de cinzas (0,29%), extrativos (4,40%), holocelulose (70,88%) e lignina (24,71%) estão condizentes aos valores citados por KLOCK & ANDRADE (2013) para folhosas (cinzas: 0,2 a 0,5%; extrativos: 3 ± 2%; celulose + polioses: 75 ± 5%; lignina: 20 ± 4%).

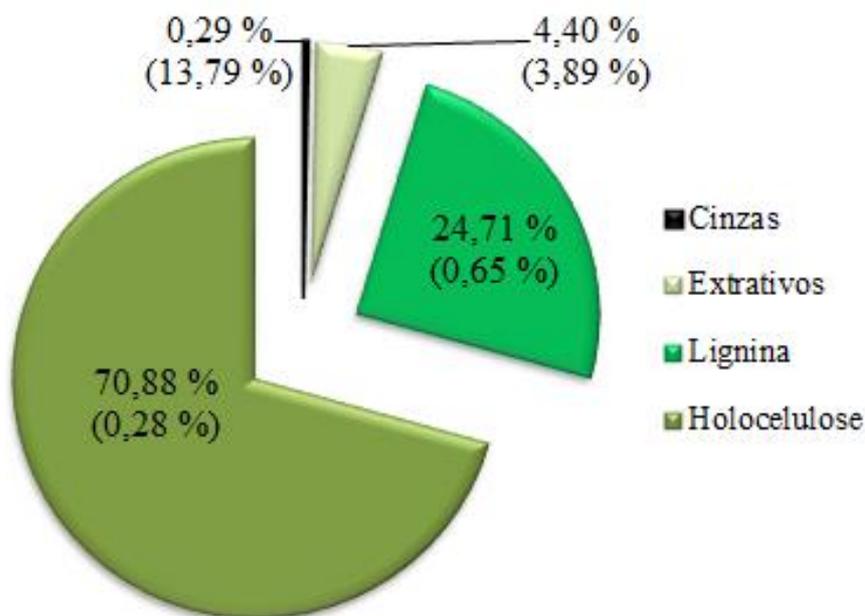


Figura 2. Composição química da madeira de *L. styraciflua*.

Figure 2. Chemical composition of *L. styraciflua*.

Na Tabela 2 observa-se a comparação da composição química da madeira de *L. styraciflua* com outros estudos com a mesma espécie, de diferentes idades e procedências, bem como com espécies/híbridos do gênero de *Eucalyptus*.

Tabela 2. Comparação da composição química da madeira de *L. styraciflua* com outras espécies.
 Table 2. Comparison of the chemical composition of *L. styraciflua* wood with other species.

Espécie	Idade (anos)	Procedência	CZ (%)	EX (%)	LG (%)	HC (%)
<i>L. styraciflua</i> ¹	7	SC	0,29	4,40	24,71	70,88
<i>L. styraciflua</i> ²	8	ES	-	4,13	28,20	67,67
<i>L. styraciflua</i> ³	16	PR	-	7,40	21,60	71,00
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁴	5	PR	0,21	2,63	27,12	70,25
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁵	7	SP	-	2,50	28,54	68,90
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁶	6	SP	0,45	3,06	28,09	68,85

Em que: CZ = cinzas; EX= extrativos; LG = lignina; HC = holocelulose. Fonte: ¹ presente estudo; ² FREITAS et al. (2017); ³ MATTOS et al. (2001); ⁴ VIVIAN et al. (2017); ⁵ BASSA (2006); ⁶ SEGURA (2012).

O teor de cinzas encontrado para a espécie de *L. styraciflua* foi similar ao relatado por VIVIAN et al. (2017), porém inferior ao citado por SEGURA (2012), para o híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*. CARDOSO et al. (2001) mencionam que para a indústria de celulose são desejáveis madeiras com baixos teores de minerais, pois estes podem causar problemas como corrosão, erosão e entupimentos, diminuindo a vida útil dos maquinários utilizados resultando em perdas de produção para a indústria. Diante disso, pode-se considerar que a madeira de *L. styraciflua* apresenta um valor baixo de minerais, característica desejável para o processo de polpação.

O teor de extrativos encontrado para a madeira de *L. styraciflua* no estudo foi semelhante ao valor observado por FREITAS et al. (2017) e inferior aos verificado por MATTOS et al. (2001), avaliando a mesma espécie aos 8 e 16 anos de idade, respectivamente. A diferença observada em relação aos resultados obtidos por MATTOS et al. (2001) pode estar relacionada à diferença de idade das árvores, pois de acordo com SILVA et al. (2005), o teor de extrativos da madeira de árvores mais jovens tendem a serem menores que os encontrados nas madeiras adultas. Quando comparado às madeiras do gênero *Eucalyptus* verifica-se que o teor de extrativos da madeira de *L. styraciflua* é superior aos valores citados por VIVIAN et al. (2017), BASSA (2006) e SEGURA (2012). De acordo com SEGURA (2012) os extrativos não são favoráveis para o processo de polpação, pois formam o chamado "pitch", causando incrustações nos equipamentos, aumentando os custos de manutenção. Como a madeira de *L. styraciflua* possui teor de extrativos mais elevado em relação ao gênero *Eucalyptus*, a mesma pode apresentar um menor rendimento na produção e maior dificuldade de branqueamento da polpa celulósica levando a um maior consumo de reagentes químicos (ANDRADE 2006).

O teor de lignina encontrado para o *L. styraciflua* no estudo apresentou-se inferior ao citado por FREITAS et al. (2017) e superior ao relatado por MATTOS et al. (2001) para a mesma espécie. Comparando às madeiras de *E. grandis* x *E. urophylla*, o *L. styraciflua* apresentou valor inferior, o que é muito interessante, pois de acordo com a literatura madeiras com altos teores de lignina são mais difíceis de cozinhar, apresentando maior dificuldade na individualização das fibras da madeira, consumindo mais reagentes durante o processo de polpação. Desta forma o menor teor de lignina é uma vantagem para a madeira de *L. styraciflua*, pois a mesma poderá exigir menores quantidades de álcali para a deslignificação, proporcionando economia às indústrias papeleiras, bem como ganhos em rendimento (ROSA 2003). Salienta-se apenas que isto é um indicativo, o qual deve ser comprovado a partir de curvas de polpação.

Quanto ao teor de holocelulose, o valor encontrado no presente estudo foi superior ao relatado por FREITAS et al. (2017) e similar ao citado por MATTOS et al. (2001). Já comparando aos híbridos de *Eucalyptus*, o valor observado foi semelhante ao relatado por VIVIAN et al. (2017), e superior aos valores citados por BASSA (2006) e SEGURA (2012). Conforme FAVARO (2015) o teor de holocelulose está intimamente associado ao rendimento da polpação, constituindo assim um aspecto positivo para o material avaliado, visto que o mesmo pode apresentar rendimento muito próximo ao híbrido mais utilizado no país.

Morfologia das fibras e indicadores anatômicos

Na Figura 3 é possível observar a média e a variação das dimensões das fibras da madeira de *L. styraciflua* no sentido radial (0% próximo a medula e 100% próximo a casca).

O comprimento e a espessura da parede celular das fibras foram as únicas dimensões que apresentaram variação significativa no sentido radial, aumentando da medula em direção a casca. Já a largura e diâmetro do lúmen, mesmo com tendência de aumento, não apresentaram diferença estatística significativa. A tendência de aumento no sentido radial é, de acordo com ALZATE (2009), um indicativo de predominância de madeira juvenil. HASSEGAWA (2003) afirma que a atividade cambial é mais acelerada durante a formação da madeira juvenil, tendendo a estabilizar durante a formação da madeira adulta, com a maturação do câmbio vascular. Observa-se na Figura 3 que as dimensões estão com tendência de

aumento, ainda sem indicativo de estabilização, em especial o comprimento das fibras, o que demonstra que é formada apenas por madeira juvenil, a qual apresentava sete anos de idade quando foi avaliada.

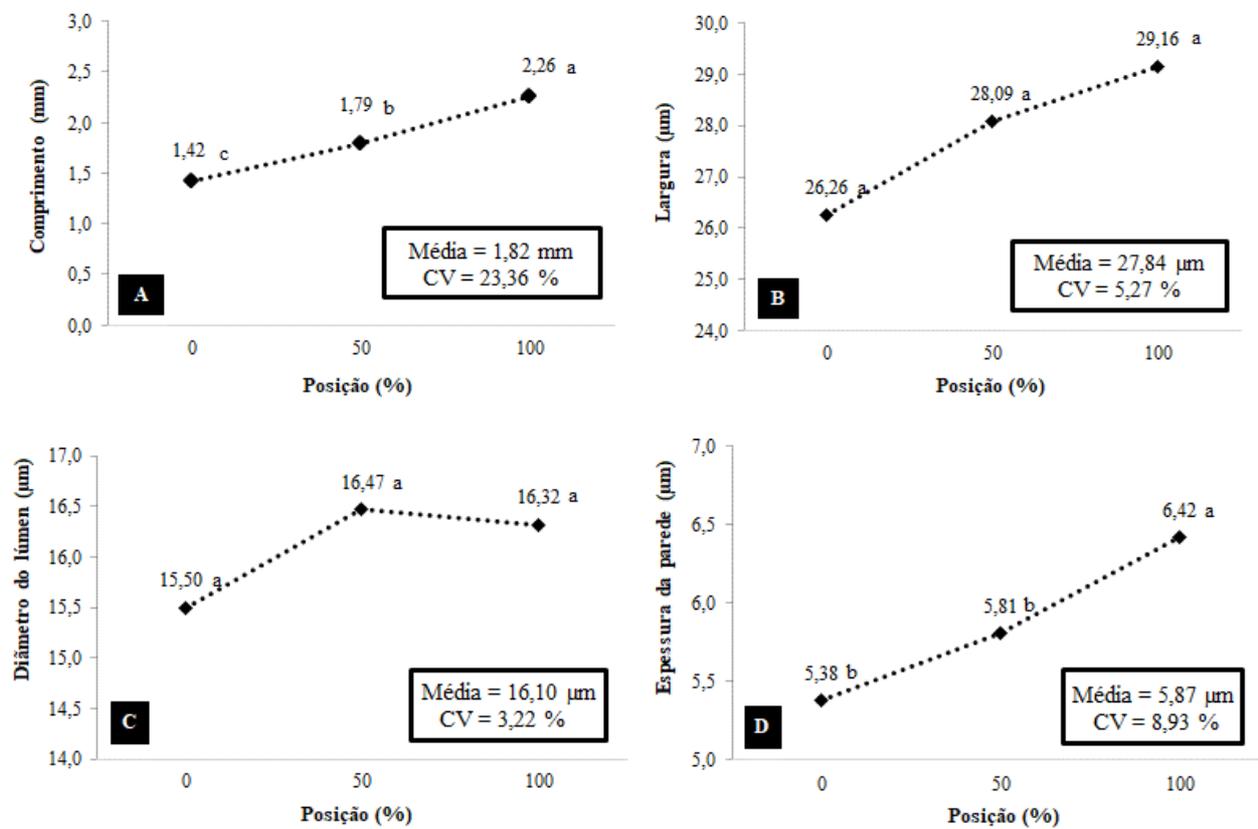


Figura 3. Variação das dimensões das fibras da madeira de *L. styraciflua*. (A) comprimento; (B) largura; (C) diâmetro do lúmen; (D) espessura da parede.

Figure 3. Variation in the fibers dimensions of the *L. styraciflua* wood. (A) length; (B) width; (C) lumen diameter; (D) wall thickness.

Na Tabela 3 pode ser observada a comparação das dimensões médias das fibras da madeira de *L. styraciflua* com outras árvores da mesma espécie, bem como para espécies do gênero *Eucalyptus*.

Tabela 3. Comparação das dimensões médias das fibras da madeira de *L. styraciflua* com outras espécies.
Table 3. Comparison of the average dimensions of the fibers of *L. styraciflua* wood with other species.

Espécie	Idade (anos)	Procedência	C (mm)	L (µm)	DL (µm)	EP (µm)
<i>L. styraciflua</i> ¹	7	SC	1,82	27,84	16,10	5,87
<i>L. styraciflua</i> ²	8	ES	1,98	30,83	15,70	7,56
<i>L. styraciflua</i> ³	16	PR	1,55	-	-	-
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁴	5	PR	1,01	16,57	8,87	3,85
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁵	7	BA	1,07	20,06	10,59	4,73
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁶	7	SP	1,08	17,14	8,76	4,19

Em que: C = comprimento; L = largura; DL = diâmetro do lúmen; EP = espessura da parede celular. Fonte: ¹ Presente estudo; ² FREITAS et al. (2017); ³ MATTOS et al. (2001); ⁴ VIVIAN et al. (2017); ⁵ ALVES et al. (2011); ⁶ CARVALHO & NAHUIZ (2001).

De acordo com o comprimento médio das fibras da madeira de *L. styraciflua* (1,82 mm), é possível classificá-las como moderadamente longas (entre 1,60 e 2,20 mm), conforme METCALFE & CHALK (1983). A espessura da parede celular das fibras (5,87 µm) pode ser considerada muito espessa (> 5 µm), de acordo com a classificação de MANIMEKALAI et al. (2002).

Comparando o comprimento médio das fibras observado no presente estudo aos citados por FREITAS et al. (2017) e MATTOS et al. (2001) para a madeira de *L. styraciflua*, o mesmo encontra-se entre

os valores relatados pelos mesmos. Já comparando o comprimento com as espécies/híbridos de *Eucalyptus*, o valor observado para o *L. styraciflua* é superior, o que positivo, se o objetivo é aumentar a resistência mecânica do papel a ser produzido.

Em relação à largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede celular, os valores observados para a madeira de *L. styraciflua* no presente estudo são similares aos relatados por FREITAS et al. (2017), porém muito superiores aos indicados por VIVIAN et al. (2017), ALVES et al. (2011) e CARVALHO & NAHUIZ (2001) para a madeira de *Eucalyptus*. De forma geral, todas as dimensões observadas para as fibras da madeira de *L. styraciflua* são superiores quando comparadas com madeira de híbridos de *E. grandis* × *E. urophylla*, que estão entre as matérias-primas mais utilizadas para produção de celulose de fibra curta no Brasil.

Na Figura 4 é possível observar a média e a variação dos indicadores anatômicos das fibras da madeira de *L. styraciflua* no sentido radial (0% próximo a medula e 100% próximo a casca).

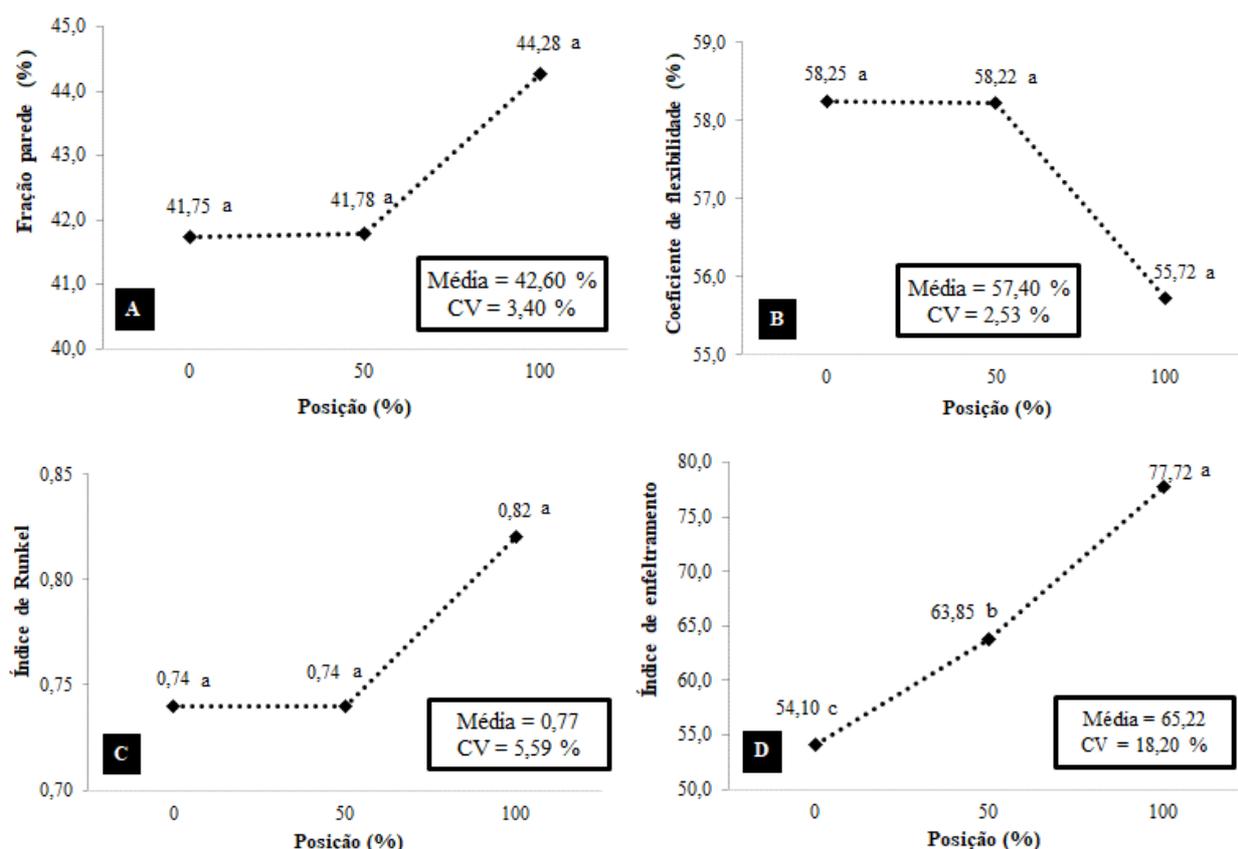


Figura 4. Variação dos indicadores anatômicos da madeira de *L. styraciflua*. (A) fração parede; (B) coeficiente de flexibilidade; (C) índice de Runkel; (D) índice de enfeltramento.

Figure 4. Variation of the anatomical indicators of *L. styraciflua* wood. (A) wall fraction; (B) flexibility coefficient; (C) Runkel index; (D) felting index.

Apenas o índice de enfeltramento apresentou variação significativa no sentido radial, aumentando da medula em direção a casca. Já a fração parede e índice de Runkel, mesmo apresentando comportamento crescente, e o coeficiente de flexibilidade decrescente, no sentido radial, ambos não apresentaram variação significativa.

Na Tabela 4 pode ser observada a comparação dos parâmetros morfológicos indicadores de qualidade da madeira de *L. styraciflua* com outras árvores da mesma espécie, bem como a comparação com espécies do gênero *Eucalyptus*.

A fração parede observada para a madeira de *L. styraciflua* (42,60%) permite enquadrá-la como média (entre 35 e 50%), conforme a classificação de KLOCK & ANDRADE (2013). SHIMOYAMA & WIECHETECK (1993) afirmam que o ideal é que a fração parede seja inferior a 40%, pois as fibras colapsariam com maior facilidade durante a formação do papel, proporcionando maior resistência (alta resistência à tração e estouro).

Tabela 4. Comparação dos parâmetros de qualidade da madeira de *L. styraciflua* com outras espécies.
 Table 4. Comparison of wood quality parameters of *L. styraciflua* with other species.

Espécie	Idade (anos)	Procedência	FP (%)	CF (%)	IR	IE
<i>L. styraciflua</i> ¹	7	SC	42,60	57,40	0,77	65,22
<i>L. styraciflua</i> ²	8	ES	49,60	50,40	1,01	65,54
<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> ³	5	PR	46,00	54,00	0,90	62,39
<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> ⁴	6	SP	45,00	55,00	0,81	-
<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> ⁵	7	SP	48,87	51,13	0,95	62,87

Em que: FP = fração parede; CF = coeficiente de flexibilidade; IR = índice de Runkel; IE = índice de enfiletramento. Fonte: ¹ presente estudo; ² FREITAS et al. (2017); ³ VIVIAN et al. (2017); ⁴ DUARTE (2007); ⁵ CARVALHO & NAHUIZ (2001).

O coeficiente de flexibilidade obtido para a madeira de *L. styraciflua* (57,40%) indica que as fibras da mesma apresentarão boa superfície de contato e união entre elas, com colapso parcial durante a formação do papel (entre 50 e 75%), conforme classificação de NISGOSKI (2005). COSTA (2011) afirma que quanto maior o coeficiente de flexibilidade, mais flexíveis serão as fibras, resultando em maior resistência à tração e ao estouro do papel.

O índice de Runkel observado para a madeira de *L. styraciflua* (0,77) possibilita classificá-la como boa para fabricação de papel, se enquadrando na categoria III (entre 0,50 e 1,00) (TOSTES et al. 2013).

Já o índice de enfiletramento obtido para a madeira de *L. styraciflua* (65,22) está acima do mínimo citado por NISGOSKI et al. (2012), que sugere que valores acima de 50 são interessantes pois conferem boas características ao papel em relação ao rasgo e arrebitamento.

Comparando os indicadores anatômicos de qualidade para produção de papel, em todos a madeira de *L. styraciflua* avaliada neste estudo foi melhor, seja para a mesma espécie citada por FREITAS et al. (2017) ou para a madeira do híbrido de *E. grandis* × *E. urophylla* (Tabela 4). A madeira de *L. styraciflua* em questão apresentou a menor fração parede, maior coeficiente de flexibilidade, menor índice de Runkel e maior índice de enfiletramento, fatos que são positivos para produção de papel, em especial porque a mesma está sendo comparada com a principal matéria-prima utilizada para produção de celulose de fibra curta do país.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos no presente estudo para *L. styraciflua* com 7 anos permitem concluir que a madeira apresenta densidade básica média, sem variação significativa ao longo do fuste das árvores, baixo teor de cinzas e lignina, e alto valor de holocelulose e extrativos, com fibras moderadamente longas e muito espessas, com rigidez média, que possibilitam colapso e boa ligação entre fibras, sendo classificada como boa para papel conforme índice de Runkel.

De maneira geral a madeira de *L. styraciflua* apresenta aptidão e bom potencial para produção de polpa celulósica, apresentando características físicas-químicas-anatômicas interessantes. Destaca-se que a densidade básica da madeira é similar aos valores observados para as madeiras de *Eucalyptus*, principal fonte de matéria-prima utilizada para produção de celulose de fibra curta. A espécie apresenta fibras mais longas que as espécies de *Eucalyptus*, o que pode conferir maior resistência ao papel. Outro aspecto positivo foi a composição química da espécie, que apresentou baixa proporção de cinzas e lignina, o que é benéfico, pois exigirá menores cargas de reagentes químicos para a deslignificação, proporcionando economia às indústrias papeleiras e o alto teor de holocelulose que tende a elevar o rendimento da polpação.

REFERÊNCIAS

- ABNT. 2003. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Determinação da densidade básica em madeira: NBR 11.941. Rio de Janeiro: ABNT. 6p.
- ALMEIDA FS. 2003. Influência da carga alcalina no processo de polpação Lo-Solids para madeiras de Eucalipto. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 115p.
- ALVES ICN et al. 2011. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose kraft. Ciência Florestal 21: 167-174.
- ALZATE SBA. 2009. Estrutura anatômica da madeira de clones de *Eucalyptus*. Revista Investigaciones Aplicadas 3: 1-14.
- ANDRADE AS. 2006. Qualidade da madeira, celulose e papel em *Pinus taeda* L.: influência da idade e classe de

- produtividade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 94p.
- BASSA AGMC. 2006. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do processo Lo-Solids. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 169p.
- BURGER LM & RICHTER HG. 1991. Anatomia da madeira. São Paulo: Nobel. 154 p.
- CARDOSO GV et al. 2001. Adequação de metodologia amostral de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* para determinação do teor de cinzas. In: 34º Congresso Anual de Celulose e Papel. Anais... São Paulo: ABTCP. p.7.
- CARVALHO PER. 1998. Espécies introduzidas alternativas às dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* para reflorestamento no centro sul do Brasil. In: GALVÃO APM. 1998. Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais. Colombo: Embrapa Florestas. 75-99.
- CARVALHO AM & NAHUZ MAR. 2001. Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha. Scientia Forestalis, 59: 61-76.
- COSTA JA. 2011. Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantado no Distrito Federal, para produção de celulose Kraft. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Brasília: UNB. 86p.
- DUARTE FAS. 2007. Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas a produção de polpa celulósica Kraft. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 107p.
- EMBRAPA. 2012. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas, Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas. 333p.
- FAVARO JSC. 2015. Estudos da polpação kraft, branqueamento e refino de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Guaratinguetá: UNESP. 178p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. 2010. Wood handbook - Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508p.
- FREITAS TP et al. 2017. Potencial de uso da madeira de Liquidâmbar sp. para a produção de polpa celulósica e papel. Ciências Agrárias 60: 328-334.
- HASEGAWA M. 2003. Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 107p.
- IBÁ. 2022. Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual 2022. São Paulo: IBÁ. 49 p.
- IAWA. 1989. International Association of Wood Anatomists. List of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin 10: 219-332.
- KLOCK U & ANDRADE AS. 2013. Química da madeira. 4.ed. Curitiba: UFPR. 87p.
- KORMANIK PP. 1990. *Liquidambar styraciflua* L. Sweetgum. In: BURNS RM & HONKALA BH (Eds.). Washington: Silvics of North America. p.400 - 405.
- LORENZI H et al. 2003. Árvores Exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum.
- MANIMEKALAI V et al. 2002. Fibres of *Sorghum bicolor* (L.) Moench and their potential use in paper and board making. Phytomorphology 52: 61-67.
- MATTOS PP et al. 2001. Características da madeira de *Liquidambar styraciflua*. Circular Técnica. Colombo: Embrapa Florestas 49: 1 - 4.
- METCALFE CR & CHALK L. 1983. Anatomy of the dicotyledons: wood structure and conclusion of the general introduction. 2ed. Oxford: Clarendon Press.
- NISGOSKI S. 2005. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 160p.
- NISGOSKI S et al. 2012. Características anatômicas da madeira e índices de resistência do papel de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake proveniente de plantio experimental. Scientia Forestalis 40: 203-211.
- ROSA CAB. 2003. Influência do teor de lignina da madeira de *Eucalyptus globulus* na produção e na qualidade da celulose kraft. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Santa Maria: UFSM. 149p.
- SEGURA TES. 2012. Avaliação das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* para a produção de celulose kraft pelos processos convencionais de Lo-Solids. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 99p.
- SEGURA TES. 2015. Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 198p.
- SHIMIZU JY & SPIR IHZ. 2004. Produtividade de madeira de Liquidambar (*Liquidambar styraciflua* L.) de diferentes procedências em Quedas do Iguaçu, PR. Revista Árvore 28: 487-491.
- SHIMOYAMA VRS & WIECHETECK MSS. 1993. Características da madeira e da pasta termomecânica de *Pinus patula* var. *tecunumanii* para produção de papel imprensa. IPEF 9: 63-80.
- SILVA JC et al. 2005. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. Revista Árvore 29: 455-460.
- TAPPI. 2002. Technical Association of The Pulp and Paper Industry. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C: T 211 om-02. Atlanta: TAPPI. 5p.
- TAPPI. 1997. Technical Association of The Pulp and Paper Industry. Solvent extractives of wood and pulp: T 204 cm-97.

- Atlanta: TAPPI. 4p.
- TOSTES LCL et al. 2013. Morfometria das fibras do sistema radicular de *Philodendron bipinnatifidum* Schott (Família Araceae; subgênero Meconostigma). *Biota Amazônia* 3: 15-22.
- VIVIAN MA. 2015. Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto. Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 125p.
- VIVIAN MA et al. 2017. Evaluation of yield and lignin extraction from *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* wood chips with the hydrotropic compound sodium xylenesulphonate (SXS). *BioResources* 12: 6723-6735.
- VIVIAN MA et al. 2020. Caracterização tecnológica da madeira de *Cupressus lusitanica* visando à produção de polpa celulósica. *Pesquisa Florestal Brasileira* 40: 1-9.
- VIVIAN MA et al. 2021. Características da madeira de *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir). *Scientia Forestalis* 49: 1-13.
- VIVIAN MA et al 2022. Avaliação do potencial da madeira de *Pinus greggii* para produção de polpa celulósica. *Revista de Ciências Agroveterinárias* 21: 56-65.