v7.n12.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ANÁLISE DAS DISCREPÂNCIAS ENTRE ESTIMATIVAS FLORESTAIS E DETERMINAÇÕES LABORATORIAIS DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE CELULOSE

ANALYSIS OF DISCREPANCIES BETWEEN FOREST ESTIMATES AND LABORATORY DETERMINATIONS OF BASIC WOOD DENSITY: A CASE STUDY AT A PULP MILL

ANÁLISIS DE LAS DISCREPANCIAS ENTRE ESTIMACIONES FORESTALES Y DETERMINACIONES DE LABORATORIO DE LA DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA: UN ESTUDIO DE CASO EN UNA INDUSTRIA DE CELULOSA

Juliana Regina de Souza Ferraz[1], Sandra Cristina Marchiori de Brito[2], Elizangela Veloso Saes[3], Elida de Paula Moraes Corveloni [4]

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i12.9870

PUBLICADO: 12/2026

RESUMO

A densidade básica da madeira é um parâmetro essencial para o planejamento florestal, o controle do cozimento Kraft e o cálculo do Consumo Específico de Madeira (CEM) na indústria de celulose. Este trabalho objetivou analisar as discrepâncias entre as estimativas florestais e as determinações laboratoriais da densidade básica em uma indústria de celulose Kraft em Três Lagoas (MS), aplicando ferramentas estatísticas e de gestão da qualidade. Trata-se de um estudo de caso, de abordagem qualitativa com apoio de análises quantitativas, que avaliou registros diários de duas linhas de produção (Fábrica 1 e Fábrica 2), entre janeiro de 2025 e setembro de 2026, além de comparar os procedimentos de inventário florestal e de análise laboratorial. As comparações foram realizadas entre registros correspondentes a datas coincidentes, sem vinculação direta com os mesmos lotes físicos de madeira. Os resultados indicaram baixa dispersão nas estimativas florestais (CV = 1,15%) frente à maior variabilidade diária laboratorial (CV de 3,67% na Fábrica 1 e 3,04% na Fábrica 2) e inversão nas diferenças médias anuais entre 2025 e 2026, passando de +13,32 para −10,37 kg/m³ na Fábrica 1 e de +10,75 para −3,63 kg/m³ na Fábrica 2, com implicações simuladas de até +2,83% no CEM. O Diagrama de Ishikawa (6M) mapeou 18 subcausas potenciais associadas às discrepâncias, priorizadas pela Matriz GUT. A categoria Método obteve a maior pontuação (305 pontos), destacando-se a ausência de recalibração periódica dos modelos preditivos florestais, falhas de rastreabilidade e variações operacionais, subsidiando um plano de ação propositivo estruturado via 5W2H.

PALAVRAS-CHAVE: Densidade básica da madeira. Polpação Kraft. Consumo específico de madeira. Ferramentas da qualidade. Matriz GUT.

ABSTRACT

Basic wood density is an essential parameter for forest planning, Kraft pulping control, and the calculation of Specific Wood Consumption (SWC) in the pulp industry. This study aimed to analyze the discrepancies between forest estimates and laboratory determinations of basic wood density in a Kraft pulp mill in Três Lagoas (MS), through the integrated application of statistical and quality management tools.

[1] Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS, Câmpus de Três Lagoas), com atuação na área de Controle de Qualidade.
[2] Graduada em Matemática (UFMS), doutora em Engenharia Elétrica (UNESP) e professora titular da UFMS (Câmpus de Três Lagoas), na área de Estatística e Controle Estatístico de Processos.
[3] Graduada em Engenharia de Produção (UEM), doutora em Gestão da Produção (UFSCar) e professora associada da UFMS (Câmpus de Três Lagoas), na área de Gestão da Produção e da Qualidade.
[4] Graduada, mestre e doutora em Engenharia Química (UEM) e professora titular da UFMS (Câmpus de Três Lagoas), na área de Engenharia de Processos e Operações Unitárias.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

This is a qualitative case study supported by quantitative analyses that evaluated daily records from two production lines (Mill 1 and Mill 2) between January 2025 and September 2026, in addition to comparing forest inventory and laboratory analysis procedures. Comparisons were performed between records corresponding to matching dates, with no necessary linkage between the measurements and the same physical wood batches. The results indicated low dispersion in forest estimates (CV = 1.15%) compared to higher daily laboratory variability (CV of 3.67% in Mill 1 and 3.04% in Mill 2), as well as a reversal in annual mean differences between 2025 and 2026, shifting from +13.32 to −10.37 kg/m³ in Mill 1 and from +10.75 to −3.63 kg/m³ in Mill 2, with simulated impacts of up to +2.83% on SWC. The Ishikawa Diagram (6M) mapped 18 potential subcauses associated with the discrepancies, prioritized using the GUT Matrix. The Method category achieved the highest score (305 points), highlighting the lack of periodic recalibration of predictive forest models, traceability gaps, and operational variations, supporting a propositional action plan structured via the 5W2H tool.

KEYWORDS: *Basic Wood Density. Kraft Pulping. Specific Wood Consumption. Quality Tools. GUT Matrix.*

RESUMEN
La densidad básica de la madera es un parámetro esencial para la planificación forestal, el control de cocción Kraft y el cálculo del Consumo Específico de Madera (CEM) en la industria celulósica. Este trabajo tuvo como objetivo analizar las discrepancias entre las estimaciones forestales y las determinaciones de laboratorio de la densidad básica en una planta de celulosa Kraft en Três Lagoas (MS), aplicando herramientas estadísticas y de gestión de la calidad. Este estudio de caso cualitativo con apoyo de análisis cuantitativos evaluó registros diarios de dos líneas de producción (Fábrica 1 y Fábrica 2), entre enero de 2025 y septiembre de 2026, además de comparar los procedimientos de inventario forestal y análisis de laboratorio. Las comparaciones se realizaron entre registros correspondientes a fechas coincidentes, sin vinculación necesaria con los mismos lotes físicos de madera. Los resultados indicaron baja dispersión en las estimaciones forestales (CV = 1,15%) frente a la mayor variabilidad diaria en laboratorio (CV de 3,67% en Fábrica 1 y 3,04% en Fábrica 2) e inversión en las diferencias medias anuales entre 2025 y 2026, pasando de +13,32 a −10,37 kg/m³ en Fábrica 1 y de +10,75 a −3,63 kg/m³ en Fábrica 2, con implicaciones simuladas de hasta +2,83% en el CEM. El Diagrama de Ishikawa (6M) permitió mapear 18 subcausas potenciales, priorizadas mediante la Matriz GUT. La categoría Método obtuvo la mayor puntuación (305 puntos), subsidiando un plan de acción propositivo estructurado mediante la herramienta 5W2H.

PALABRAS CLAVE*: Densidad Básica de la Madera. Pulpaje Kraft. Consumo Específico de Madera. Herramientas de la Calidad. Matriz GUT.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial da indústria de celulose, sustentada, entre outros fatores, pelos elevados índices de produtividade florestal do gênero Eucalyptus (IBÁ, 2024). Nesse setor, a madeira constitui uma das principais matérias-primas e representa parcela significativa dos custos de produção, considerando as despesas associadas ao cultivo, manejo, colheita, logística e processamento industrial.

Na produção de celulose pelo processo Kraft, a densidade básica da madeira constitui um parâmetro tecnológico relevante para o planejamento do abastecimento e o controle

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

industrial, pois influencia a relação entre o volume de madeira processado e sua massa, o consumo de reagentes químicos e o rendimento do cozimento (Queiroz *et al.*, 2004). Entretanto, a madeira apresenta variabilidade natural decorrente de fatores genéticos, anatômicos e edafoclimáticos, o que representa um desafio para a previsibilidade das propriedades da matéria-prima e para a estabilidade dos processos industriais.

Na interface entre as operações florestais e industriais, a avaliação da densidade básica envolve procedimentos distintos. A área florestal utiliza medições indiretas em árvores em pé e modelos preditivos para estimar a densidade da madeira destinada ao abastecimento da fábrica, enquanto o laboratório industrial realiza determinações físicas em amostras compostas de cavacos provenientes da produção (Gouvêa *et al.*, 2011; Hardner *et al.*, 2023). Nesse contexto, é fundamental distinguir conceitualmente duas naturezas de divergência: de um lado, as diferenças decorrentes dos procedimentos de obtenção e processamento dos dados (como método indireto versus hidrostático, medição pontual na altura do peito versus amostragem da tora inteira picada e projeções suavizadas por talhão versus ensaios diários); de outro, as oscilações associadas a mudanças efetivas nas propriedades físicas da madeira abastecida ao longo do tempo, resultantes da alternância de clones, idades de corte, frentes de colheita e tempos de estocagem no pátio.

Essas discrepâncias podem repercutir no planejamento do abastecimento e no controle industrial, especialmente na estimativa da massa de madeira alimentada no digestor e no cálculo do Consumo Específico de Madeira (CEM), indicador expresso em volume de madeira necessário para produzir uma tonelada de celulose seca ao ar (m^3/tsa). Quando a densidade considerada no planejamento diverge daquela efetivamente determinada para a madeira processada, podem ocorrer diferenças nas estimativas de consumo de matéria-prima e dificuldades no ajuste dos parâmetros operacionais do cozimento, com possíveis implicações para o rendimento e a qualidade da polpa (Moraes; Piratelli; Achcar, 2014; Queiroz *et al.*, 2004).

Embora a literatura técnica aborde amplamente a variabilidade tecnológica da madeira de *Eucalyptus* sob a ótica silvicultural (Lima *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2021) ou a comparação experimental entre métodos destrutivos e não destrutivos em nível de árvore (Gouvêa *et al.*, 2011; Hardner *et al.*, 2023), observa-se uma lacuna científica quanto a investigações aplicadas que examinem o descompasso operacional de rotina entre as bases de dados do planejamento florestal e do laboratório industrial em plantas de celulose de grande porte. A contribuição original deste estudo reside na integração sistemática entre a análise estatística descritiva de séries históricas operacionais e as ferramentas gerenciais de qualidade (Diagrama de Ishikawa 6M, Matriz de Priorização GUT e plano de ação 5W2H), permitindo conectar a quantificação empírica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

das divergências entre bases de dados à estruturação e hierarquização de hipóteses operacionais para melhoria contínua (Carpinetti, 2016; Montgomery, 2020).

Diante desse cenário, estabelece-se a seguinte questão de pesquisa: de que maneira a aplicação integrada de ferramentas estatísticas da qualidade e de metodologias de análise de causa-raiz pode contribuir para compreender as origens das discrepâncias entre as estimativas florestais e as determinações laboratoriais da densidade básica da madeira, subsidiando a proposição de melhorias no processo de uma indústria de celulose?

Para responder a essa questão, o objetivo geral deste trabalho é analisar as discrepâncias entre as estimativas florestais e as determinações laboratoriais da densidade básica da madeira em uma indústria de celulose, por meio da aplicação de ferramentas estatísticas da qualidade e de metodologias de análise de causa-raiz, visando identificar possíveis origens dessas diferenças e subsidiar a proposição de melhorias no processo.

Para alcançar o objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos: caracterizar os dados de densidade básica provenientes das áreas florestal e industrial, considerando suas características e condições de obtenção; investigar padrões de variação e possíveis diferenças sistemáticas entre as estimativas florestais e as determinações laboratoriais; identificar e analisar possíveis causas das discrepâncias, considerando os procedimentos de avaliação e o fluxo de informações entre as áreas; e propor ações de melhoria com base nos resultados das análises e na priorização das causas identificadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Densidade básica da madeira e sua importância na produção de celulose kraft

A densidade básica (*ρb*) é um dos principais parâmetros tecnológicos para avaliar a qualidade da madeira na indústria de celulose, expressando a razão entre a massa seca (anidra) e o volume saturado da madeira, conforme a Equação 1 (Queiroz *et al.*, 2004):

$$\rho b = \frac{m_{anidra}}{V_{saturado}} \quad (1)$$

A massa anidra (m_{anidra}) corresponde ao material com 0% de umidade após secagem em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante. Já o volume saturado ($V_{saturado}$) refere-se à condição em que a madeira se encontra com teor de umidade igual ou superior ao Ponto de Saturação das Fibras (PSF, situado em torno de 28% a 30% de umidade). No PSF, as paredes celulares encontram-se inteiramente saturadas por água de impregnação (água higroscópica), atingindo sua dimensão volumétrica máxima; acima desse ponto, a entrada adicional de água livre nos lúmens e cavidades celulares não provoca expansão volumétrica adicional na madeira,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

propriedade física que assegura a reprodutibilidade da medição do volume saturado por imersão em água (Kollmann; Côté, 1968; ABNT, 2003). Por ser um material biológico heterogêneo, a madeira de *Eucalyptus* apresenta anisotropia nos eixos longitudinal, radial e tangencial, além de variações significativas no sentido base-topo do fuste e entre diferentes materiais genéticos, idades de corte e condições edafoclimáticas (Lobão *et al.*, 2004; Lima *et al.*, 2020).

No processo de polpação Kraft, responsável por mais de 90% da celulose de mercado mundial, os cavacos são cozidos entre 150°C e 170°C em presença de licor branco (NaOH e Na2S) para promover a deslignificação seletiva e individualizar as fibras (Gullichsen; Fogelholm, 2000; Smook, 2016). A estabilidade do cozimento depende da carga de álcali ativo/efetivo sobre a madeira seca, do Fator H e do número Kappa, que indica o teor de lignina residual na polpa (TAPPI, 2016). Segundo Queiroz *et al.* (2004) e Gomide *et al.* (2010), oscilações na densidade básica afetam a impregnação dos cavacos, o rendimento da polpação e o número Kappa, impactando o consumo de químicos no branqueamento.

Além do impacto químico, a madeira representa de 50% a 70% do custo operacional da celulose, sendo monitorada pelo Consumo Específico de Madeira (CEM), expresso em m³/tsa segundo a Equação 2 (Foelkel, 2009; Moraes; Piratelli; Achcar, 2014):

$$CEM = \frac{1}{\rho b * R_d * (1 - Perdas)} \quad (2)$$

Mantidos constantes o rendimento depurado (*Rd*) e as perdas, o aumento da densidade básica reduz diretamente o volume de madeira necessário por tonelada de celulose. Assim, divergências entre a densidade estimada no planejamento e a real processada prejudicam o cálculo da massa seca alimentada no digestor, descalibrando a relação licor/madeira e a apuração do CEM (Gomide *et al.*, 2010; Foelkel, 2009).

2.2. Métodos de determinação da densidade básica da madeira

A determinação da densidade básica ocorre por dois procedimentos principais na cadeia produtiva: estimativas indiretas em campo pela área florestal e ensaios físicos em cavacos no laboratório industrial (Foelkel, 2009; Gouvêa *et al.*, 2011).

No inventário florestal pré-colheita, o abate extensivo de árvores para amostragem destrutiva de discos ao longo do fuste é restrito pelo elevado custo operacional e pelo tempo demandado (Greaves *et al.*, 1996; Hardner *et al.*, 2023). Por isso, empregam-se métodos indiretos semidestrutivos na posição do Diâmetro à Altura do Peito – DAP (padrão dendrométrico localizado a 1,30 m acima do nível do solo), destacando-se a resistografia, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) e o penetrômetro de impacto Pilodyn (Gouvêa *et al.*, 2011; Hardner *et al.*, 2023). O *Pilodyn* dispara um pino metálico calibrado com energia constante contra o lenho

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

externo (após abertura de janela na casca), cuja profundidade de penetração apresenta correlação inversa com a densidade da madeira. Essas leituras de campo são inseridas em modelos estatísticos e de efeitos mistos previamente ajustados com árvores-amostra para predizer a densidade básica média dos talhões (Oliveira *et al.*, 2021).

No laboratório industrial, por sua vez, a determinação segue normas técnicas padronizadas, como a ABNT NBR 11941 e a SCAN-CM 43:95, aplicadas sobre amostras compostas diárias de cavacos coletadas na entrada do processo (ABNT, 2003; SCAN, 1995). Após a homogeneização e o quarteamento, os cavacos são submersos em água sob vácuo ou pressão em autoclave até completa saturação (acima do PSF). Em seguida, remove-se a água livre superficial das partículas, determina-se o volume saturado por deslocamento hidrostático (Princípio de Arquimedes) e seca-se o material em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante para obtenção da massa anidra.

As diferenças intrínsecas entre as duas abordagens geram fontes estruturais de variação. Enquanto o Pilodyn avalia uma camada superficial do lenho externo restrita a 1,30 m de altura, dependendo da estabilidade das equações de calibração para inferir a densidade da árvore inteira (Greaves *et al.*, 1996; Oliveira *et al.*, 2021), a madeira apresenta expressiva variação radial (medula-casca) e longitudinal (base-topo) ao longo do fuste (Lima *et al.*, 2020). Adicionalmente, o laboratório analisa cavacos misturados da tora comercial inteira, estando sujeito a incertezas de amostragem primária na correia transportadora, variações granulométricas e sensibilidade operacional na etapa de drenagem superficial pós-autoclave (Gy, 1998; ABNT, 2003).

2.3. Variabilidade, discrepâncias de medição e qualidade da informação

Todo sistema de medição e predição está sujeito a incertezas metrológicas e operacionais decorrentes do método, dos instrumentos, da representatividade amostral e do ambiente (Carpinetti, 2016; Montgomery, 2020). Na avaliação comparativa entre dois sistemas de registro, a exatidão refere-se à proximidade das medidas em relação a um valor verdadeiro ou de referência, enquanto a precisão reflete o grau de dispersão de medições sucessivas (Montgomery, 2020). Na análise estatística de diferenças pareadas no tempo (di), é fundamental distinguir dois indicadores complementares: a diferença média assinada ($\bar{d}$) e o Erro Médio Absoluto (EMA). A diferença média assinada corresponde à média aritmética simples das diferenças com seus respectivos sinais positivos ou negativos, indicando a direção predominante do afastamento entre duas séries, mas permitindo compensação algébrica entre desvios de sinais opostos. Já o EMA corresponde à média aritmética dos módulos das diferenças (|di|),

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

medindo a magnitude média do afastamento diário independentemente da direção, sem que valores positivos anulem valores negativos (Bussab; Morettin, 2017).

Segundo a teoria da amostragem de Gy (1998), a heterogeneidade de materiais particulados como cavacos faz com que a coleta e a preparação da amostra tenham forte impacto nos resultados. Ademais, entre a colheita florestal e a picagem na fábrica, a madeira passa por transporte, estocagem em pilhas e mistura no pátio. Por isso, a padronização e a rastreabilidade dos lotes são essenciais para garantir que o registro laboratorial corresponda ao mesmo material estimado pela floresta (Falconi, 2014).

Para diagnosticar essas variações, utilizam-se ferramentas estatísticas como medidas descritivas (média, mediana, desvio-padrão e coeficiente de variação), estratificação por unidade ou período e gráficos de caixa (*boxplots*) para avaliação de quartis e valores atípicos (*outliers*) (Werkema, 2014; Montgomery, 2020; Tukey, 1977; Bussab; Morettin, 2017). Inconsistências não tratadas entre os setores prejudicam a definição do mix de alimentação, o controle do cozimento e o fechamento do CEM (Moraes; Piratelli; Achcar, 2014).

2.4. Gestão da qualidade e melhoria contínua aplicada à análise de discrepâncias

A gestão da qualidade busca reduzir a variabilidade dos processos por meio da identificação e do tratamento sistemático das causas fundamentais dos problemas operacionais (Ishikawa, 1985; Juran; Godfrey, 1999; Montgomery, 2020). A aplicação combinada de ferramentas estatísticas e gerenciais permite transformar dados históricos de rotina em diagnósticos estruturados, conectando a quantificação do problema ao planejamento de ações corretivas e preventivas (Werkema, 2014; Carpinetti, 2016).

Na etapa de diagnóstico de causas potenciais, utiliza-se inicialmente o brainstorming (tempestade de ideias), técnica participativa que reúne o conhecimento prático de profissionais envolvidos na rotina do processo para levantar hipóteses sobre as origens de uma anomalia (Werkema, 2014; Carpinetti, 2016). As ideias geradas no brainstorming são então organizadas no Diagrama de Causa e Efeito (Diagrama de Ishikawa ou Espinha de Peixe), que estratifica as subcausas nas seis categorias dos 6M: Método, Máquina (ou Sistema), Medida, Material, Mão de Obra e Meio Ambiente (Ishikawa, 1985; Carpinetti, 2016).

Para apoiar a tomada de decisão após o mapeamento no Diagrama de Ishikawa, aplica-se a Matriz GUT (Kepner; Tregoe, 1981), na qual os especialistas ou responsáveis pela análise atribuem notas de 1 a 5 para três critérios: Gravidade (G, intensidade do impacto do problema sobre o processo), Urgência (U, pressão de prazo para intervenção) e Tendência (T, potencial de agravamento caso nenhuma ação seja tomada). O produto G×U×T permite hierarquizar tanto as subcausas individuais quanto a categoria dos 6M mais crítica. Por fim, a ferramenta 5W2H

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(*What, Why, Where, When, Who, How, How much)* desdobra as subcausas do eixo mais crítico em um plano de ação estruturado (Falconi, 2014).

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da pesquisa

Seguindo os critérios de Gil (2017), esta pesquisa classifica-se como aplicada quanto à natureza, pois emprega ferramentas da qualidade para investigar um problema real de uma indústria de celulose Kraft e propor melhorias no processo. Quanto aos objetivos, é descritiva e exploratória: descritiva por quantificar as discrepâncias entre as estimativas florestais e as determinações laboratoriais de densidade básica, e exploratória por investigar os fatores operacionais e procedimentais associados a essas diferenças.

A abordagem adotada é qualitativa com apoio de análises quantitativas. A etapa qualitativa envolve a análise documental dos procedimentos da empresa e o uso de ferramentas de causa-raiz e plano de ação, enquanto a quantitativa envolve o uso e análise de dados numéricos para tomadas de decisão. Quanto aos procedimentos técnicos, configura-se como um estudo de caso, analisando o fenômeno em seu contexto real de operação (Yin, 2015).

3.2. Procedimentos metodológicos

O estudo utilizou dados secundários de uma indústria de celulose Kraft localizada em Três Lagoas (MS), contemplando duas linhas de produção (Fábrica 1 e Fábrica 2), divididos em duas frentes:

I. Registros quantitativos: séries diárias de densidade básica determinadas no laboratório industrial (extraídas dos sistemas corporativos LIMS e *Plant Information* – PI) e séries diárias de densidade básica estimadas nos relatórios operacionais de planejamento florestal, compreendendo o período de 21 meses entre 1º de janeiro de 2025 e 30 de setembro de 2026 (total de 638 dias corridos no calendário).
II. Documentos normativos: análise documental comparativa entre as diretrizes técnicas de inventário florestal pré-colheita da empresa (baseadas em leituras indiretas com penetrômetro Pilodyn no DAP e equações preditivas) e o Procedimento Operacional Padrão do laboratório industrial (PO.11.00.0231, fundamentado nas normas ABNT NBR 11941 e SCAN-CM 43:95, com amostragem composta diária de cavacos, saturação forçada em autoclave e secagem em estufa a 105 ± 2 °C).

Para assegurar a consistência analítica e a reprodutibilidade do tratamento da base de dados, foram definidos critérios explícitos de inclusão, exclusão e pareamento temporal. Enquanto a estimativa florestal consiste em um valor diário projetado a partir do cronograma

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

de colheita e suprimento (n = 636 dias com registro disponível no período de 638 dias), as determinações laboratoriais decorrem de ensaios físicos diários realizados sobre amostras compostas de cavacos coletadas nas linhas de alimentação de cada fábrica (n = 585 registros válidos na Fábrica 1 e n = 576 na Fábrica 2). A diferença no quantitativo de registros disponíveis entre as séries deve-se a dias sem realização de ensaio laboratorial em função de paradas programadas de manutenção, paradas gerais, lavagens químicas de linha ou indisponibilidade operacional de coleta. Adotou-se como critério metodológico incluir integralmente os registros validados no sistema LIMS/PI para a caracterização descritiva de cada série (Tabelas 1 e 2) e não realizar qualquer imputação estatística para preenchimento de dados ausentes. Para o cálculo das diferenças diárias (Tabela 3 e Figura 3), adotou-se o critério de correspondência temporal estrita por data coincidente, avaliando exclusivamente os dias em que houve registro simultâneo na base florestal e na respectiva linha laboratorial (n = 585 pares na Fábrica 1 e n = 576 pares na Fábrica 2).

Ressalta-se, como delimitação metodológica central, que os registros diários não possuem chave de rastreabilidade que vincule inequivocamente a amostra composta de cavacos analisada no laboratório ao mesmo lote físico de toras estimado no campo, em razão dos tempos de transporte, estocagem em pilhas e mistura no pátio de madeira. Consequentemente, as diferenças diárias foram tratadas estritamente como comparações descritivas entre bases de dados coincidentes por data, não sendo interpretadas como erros diretos de medição sobre um mesmo material.

O desenvolvimento metodológico foi conduzido em três etapas sequenciais. Na primeira etapa (quantificação estatística), realizou-se inicialmente a compatibilização de unidades para kg/m³ e o cálculo das medidas estatísticas descritivas (média aritmética, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação e amplitude interquartil) tanto para o período consolidado quanto estratificadas por ano (2025 e 2026). A identificação de valores atípicos (*outliers*) foi realizada pelo critério de Tukey (observações situadas além de 1,5 vez a amplitude interquartil abaixo do primeiro quartil ou acima do terceiro quartil nos *boxplots*). Na ausência de registro documental de falha de ensaio ou erro de digitação no LIMS, optou-se por manter o valor atípico na série original e conduzir uma análise de sensibilidade, comparando as estatísticas descritivas com e sem a referida observação. Em seguida, calcularam-se as diferenças diárias assinadas ($\underline{d_i}$) para cada linha fabril conforme a Equação 3:

$$d_i = DF_i - DL_i \qquad (3)$$

Em que DF_i é a densidade básica estimada pela área florestal e DL_i a densidade básica determinada em laboratório, ambas referentes ao dia *i*. A partir dessas diferenças, calcularam-se a diferença média assinada ($\bar{d}$) e o Erro Médio Absoluto (EMA), além de simular-se o impacto

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

das diferenças observadas no Consumo Específico de Madeira (CEM). Ressalta-se que, neste estudo, o EMA representa a média das diferenças absolutas entre os registros correspondentes a datas coincidentes, não devendo ser interpretado como erro de medição laboratorial ou florestal. Na simulação do CEM, adotaram-se como premissas de referência parâmetros operacionais típicos da indústria de celulose Kraft de *Eucalyptus* reportados na literatura técnica (Foelkel, 2009; Moraes; Piratelli; Achcar, 2014), correspondentes a um rendimento depurado (R_d) de 52,0% e perdas operacionais no preparo de madeira de 2,0%, complementados por uma análise de sensibilidade variando o rendimento depurado entre 50,0% e 54,0%.

Na segunda etapa (investigação de causas potenciais), realizou-se inicialmente a análise documental comparativa entre as diretrizes técnicas de inventário florestal da empresa (amostragem com Pilodyn no DAP e modelos preditivos) e o Procedimento Operacional Padrão do laboratório industrial (PO.11.00.0231, fundamentado nas normas ABNT NBR 11941 e SCAN-CM 43:95), além da verificação das rotinas de registro nos sistemas LIMS e PI. Os resultados estatísticos e documentais subsidiaram a condução de sessões de brainstorming técnico com cinco profissionais selecionados pelo critério de atuação direta na operação e experiência mínima de três anos nos processos avaliados: dois analistas seniores de laboratório industrial, um supervisor de controle de qualidade, um engenheiro de processos industriais e um especialista da equipe de interface e planejamento florestal. Foram realizadas duas reuniões técnicas estruturadas, com duração aproximada de 90 minutos cada. Na primeira sessão, apresentaram-se as séries temporais e o levantamento documental, solicitando-se aos participantes a indicação livre de fatores operacionais, metrológicos, materiais e sistêmicos capazes de explicar as divergências entre as bases; ao final da reunião, as hipóteses foram consolidadas e classificadas por afinidade temática nas seis categorias dos 6M do Diagrama de Ishikawa (Método, Máquina/Sistema, Medida, Material, Mão de Obra e Meio Ambiente), selecionando-se as três subcausas mais representativas por categoria (totalizando 18 subcausas potenciais).

Na terceira etapa, em uma segunda reunião técnica com o mesmo grupo de cinco especialistas, aplicou-se a Matriz GUT às 18 subcausas mapeadas no Diagrama de Ishikawa. As notas inteiras de 1 a 5 para Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T) foram atribuídas mediante discussão técnica aberta e obtenção de consenso entre os participantes, avaliando-se: (i) em Gravidade, a intensidade da relação teórica e operacional da subcausa com os deslocamentos de patamar e com a previsibilidade do CEM; (ii) em Urgência, a criticidade de prazo para mitigação do fator na rotina entre floresta e fábrica; e (iii) em Tendência, a propensão de persistência ou agravamento das divergências na ausência de intervenção. Calculou-se a pontuação individual (G × U × T) e a soma acumulada por categoria dos 6M, avaliando-se

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

adicionalmente a estabilidade do ordenamento diante de oscilações de ±1 ponto nos escores atribuídos. Ressalta-se que a pontuação obtida na Matriz GUT reflete uma priorização gerencial de criticidade percebida sobre causas potenciais, não constituindo comprovação empírica de relação causal direta. Por fim, as subcausas integrantes da categoria prioritária foram desdobradas em um plano de ação propositivo estruturado pela ferramenta 5W2H.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização dos dados e quantificação da variabilidade

No levantamento dos registros de janeiro de 2025 a setembro de 2026, verificou-se inicialmente uma divergência na unidade de reporte: o planejamento florestal registra a densidade básica em kg/m³, enquanto o sistema laboratorial (LIMS/PI) registra em g/cm³ com três casas decimais. Para compatibilizar as bases, os dados laboratoriais foram convertidos para kg/m³ (× 1.000). A Tabela 1 resume a estatística descritiva das três séries avaliadas.

Como a série histórica de 21 meses abrange uma mudança expressiva de comportamento nos resultados laboratoriais entre 2025 e 2026, uma análise exclusivamente global (Tabela 1) pode mascarar diferenças importantes entre os períodos. Para separar a variabilidade interna de cada ano do efeito da mudança de patamar médio entre um ano e outro, a Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas estratificadas anualmente.

Tabela 1. Estatística descritiva da densidade básica da madeira (kg/m³) no período de janeiro de 2025 a setembro de 2026

Parâmetro Estatístico	Estimativa Florestal	Laboratório – Fábrica 1	Laboratório – Fábrica 2
Número de dias avaliados (n)	636	585	576
Média aritmética (kg/m³)	482,69	479,55	477,78
Mediana (kg/m³)	482,65	481,00	479,00
Desvio-padrão (kg/m³)	5,54	17,60	14,51
Coeficiente de variação – CV (%)	1,15%	3,67%	3,04%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os dados da Tabela 2 demonstram quantitativamente dois fenômenos distintos. O primeiro é a mudança acentuada de patamar nos resultados laboratoriais frente à estabilidade da estimativa florestal: enquanto a média florestal permaneceu praticamente inalterada entre 2025 (483,34 kg/m³) e 2026 (481,81 kg/m³), a média laboratorial da Fábrica 1 subiu de 470,14 kg/m³

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

para 492,42 kg/m³ (+22,28 kg/m³), e da Fábrica 2 elevou-se de 472,35 kg/m³ para 485,60 kg/m³ (+13,25 kg/m³). O segundo fenômeno refere-se ao comportamento da dispersão dentro de cada período: nota-se que o desvio-padrão global da Fábrica 1 na Tabela 1 (17,60 kg/m³) estava inflado pela diferença entre os patamares médios dos dois anos, visto que a variabilidade interna reduziu de 2025 (DP = 15,25 kg/m³; CV = 3,24%) para 2026 (DP = 11,37 kg/m³; CV = 2,31%). Comportamento semelhante, embora mais suave, ocorreu na Fábrica 2, cujo desvio-padrão passou de 13,33 kg/m³ (CV = 2,82%) em 2025 para 12,45 kg/m³ (CV = 2,56%) em 2026. Ainda assim, mesmo analisadas separadamente por ano, as medições laboratoriais mantiveram dispersão duas a três vezes superior à da estimativa florestal.

Tabela 2. Estatística descritiva da densidade básica da madeira (kg/m³) estratificada por ano de 2025 a setembro de 2026

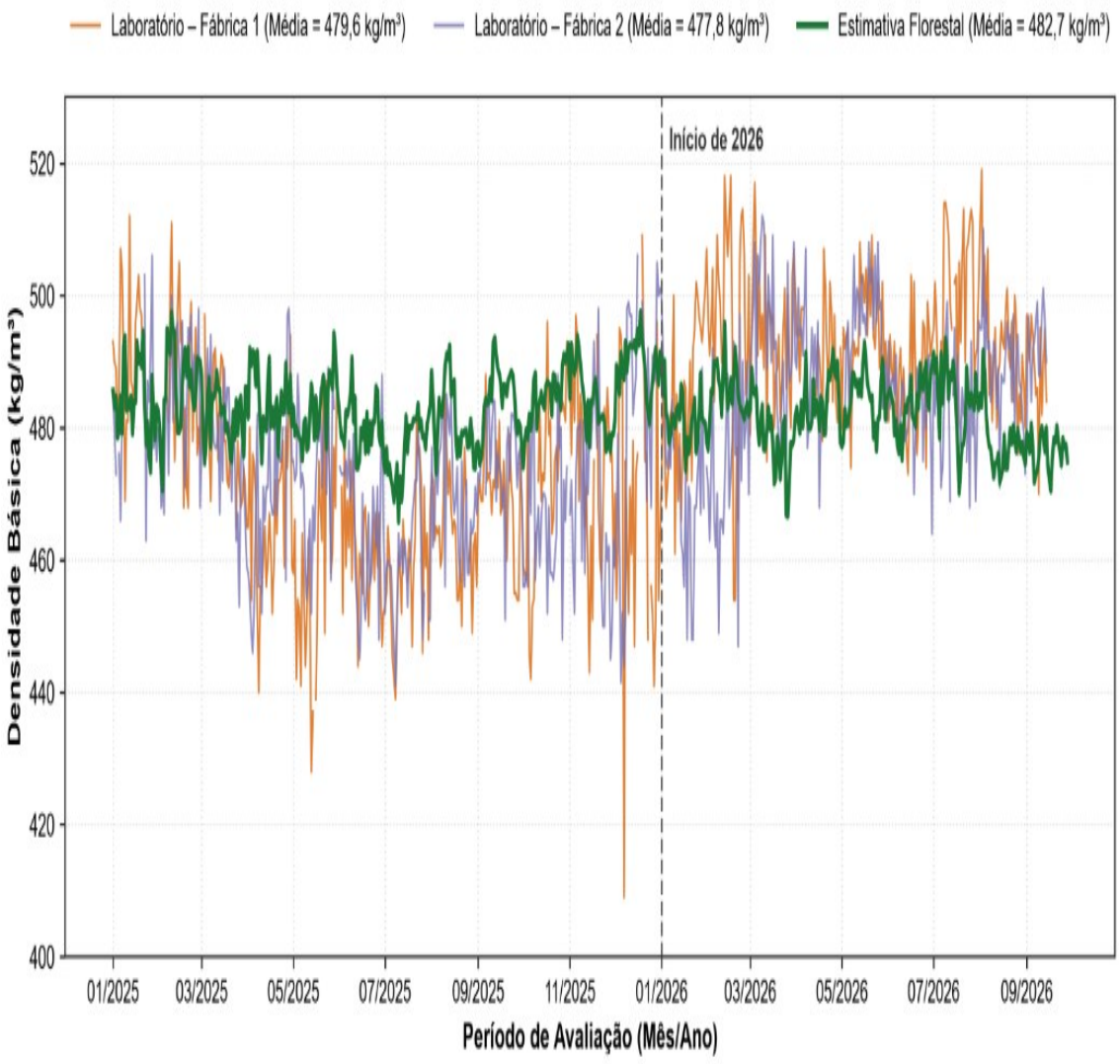
Parâmetro Estatístico	Estimativa Florestal (2025)	Estimativa Florestal (2026)	Laboratório – Fábrica 1 (2025)	Laboratório – Fábrica 1 (2026)	Laboratório – Fábrica 2 (2025)	Laboratório – Fábrica 2 (2026)
Número de dias avaliados (n)	365	271	338	247	340	236
Média aritmética (kg/m³)	483,34	481,81	470,14	492,42	472,35	485,60
Mediana (kg/m³)	483,17	481,64	470,00	493,00	472,00	487,00
Desvio-padrão (kg/m³)	5,66	5,26	15,25	11,37	13,33	12,45
Coeficiente de variação – CV (%)	1,17%	1,09%	3,24%	2,31%	2,82%	2,56%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A evolução temporal (Figura 1) ilustra esse comportamento. A Figura 1 evidencia dois comportamentos distintos ao longo do período: em 2025 (sobretudo entre março e novembro), as leituras laboratoriais permaneceram abaixo da estimativa florestal (frequentemente entre 440 e 475 kg/m³), já em 2026, a densidade medida no laboratório subiu para a faixa de 480 a 515 kg/m³, enquanto a projeção florestal manteve-se quase constante em torno de 482 kg/m³.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Série temporal da densidade básica estimada (Florestal) e determinada em laboratório (Fábricas 1 e 2) de jan./25 a set./26.

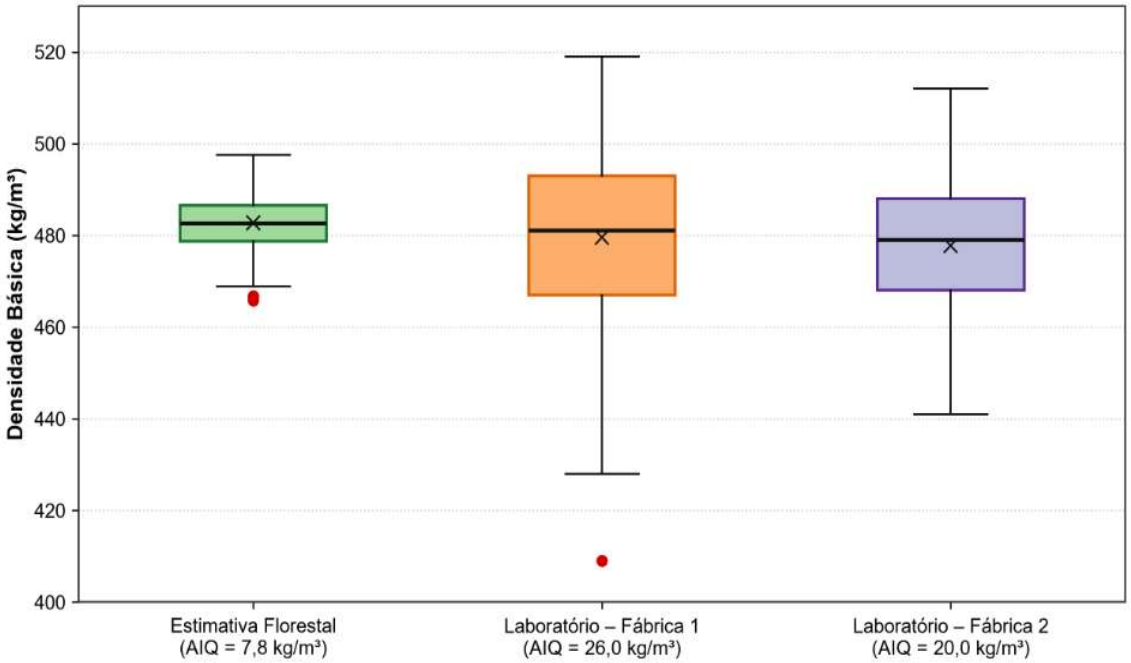


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise da dispersão dos dados é complementada pelo diagrama de caixa (*boxplot*) apresentado na Figura 2. Observa-se visualmente que a estimativa florestal possui uma caixa central bastante compacta em torno da mediana (482,65 kg/m³), refletindo sua baixa variabilidade, enquanto as determinações laboratoriais da Fábrica 1 (mediana de 481,00 kg/m³) e da Fábrica 2 (mediana de 479,00 kg/m³) apresentam caixas e hastes muito mais amplas, confirmando o maior espalhamento diário dos dados industriais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Gráfico de caixa (Boxplot) comparativo da densidade básica da madeira (Florestal, Fábrica 1 e Fábrica 2)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O gráfico da Figura 2 evidencia ainda que a Fábrica 2 não apresentou valores discrepantes, ao passo que a Fábrica 1 registrou uma única observação atípica inferior em 07/12/2025 (409,00 kg/m³). Como não houve evidência documental nos registros históricos que justificasse a exclusão imediata desse ponto, realizou-se uma análise de sensibilidade comparando os indicadores da Fábrica 1 com e sem o referido registro.

A exclusão simulada dessa observação no período global (n = 584) altera a média de 479,55 kg/m³ para 479,67 kg/m³, reduz o desvio-padrão de 17,60 kg/m³ para 17,37 kg/m³ (CV de 3,67% para 3,62%) e desloca o Erro Médio Absoluto (EMA) de 14,89 kg/m³ para 14,79 kg/m³. Mesmo avaliando isoladamente o ano de 2025 (n = 337), a média passa de 470,14 kg/m³ para 470,33 kg/m³, o desvio-padrão de 15,25 kg/m³ para 14,90 kg/m³ (CV de 3,24% para 3,17%) e o EMA de 16,08 kg/m³ para 15,89 kg/m³. Verifica-se, portanto, que essa única observação atípica não altera significativamente a média, o desvio-padrão ou o EMA, de modo que os resultados indicam que a maior dispersão laboratorial observada não é explicada exclusivamente pelo valor atípico analisado.

Entretanto, a análise anual das médias revela uma mudança importante no comportamento dos dados: em 2025, as densidades laboratoriais foram inferiores à estimativa florestal, enquanto, em 2026, passaram a apresentar valores superiores. Essa inversão

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

evidencia que a proximidade das distribuições observada no *boxplot* agregado não representa necessariamente concordância entre os métodos ao longo do período, reforçando a importância da análise temporal das discrepâncias.

A Tabela 3 sintetiza as discrepâncias diárias ($d_i = DF_i - DL_i$) por período. Os resultados da Tabela 3 evidenciam diferenças entre as estimativas florestais e os registros laboratoriais coincidentes por data, com inversão do comportamento das discrepâncias entre 2025 e 2026.

Tabela 3. Indicadores das diferenças entre as estimativas florestais e os resultados laboratoriais da densidade básica (kg/m³)

Indicador de Comparação	Florestal vs. Fábrica 1 (2025)	Florestal vs. Fábrica 1 (2026)	Florestal vs. Fábrica 1 (Total)	Florestal vs. Fábrica 2 (2025)	Florestal vs. Fábrica 2 (2026)	Florestal vs. Fábrica 2 (Total)
Dias com registros coincidentes (n)	338	247	585	340	236	576
Média Florestal no período (kg/m³)	483,46	482,05	482,86	483,10	481,97	482,64
Média Laboratorial no período (kg/m³)	470,14	492,42	479,55	472,35	485,60	477,78
Diferença média assinada – $\bar{d}$ (kg/m³)	+13,32	−10,37	+3,31	+10,75	−3,63	+4,86
Erro Médio Absoluto – EMA (kg/m³)	16,08	13,28	14,89	13,20	11,39	12,46
Desvio-padrão das diferenças (kg/m³)	14,19	14,47	17,71	13,72	13,44	14,81

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

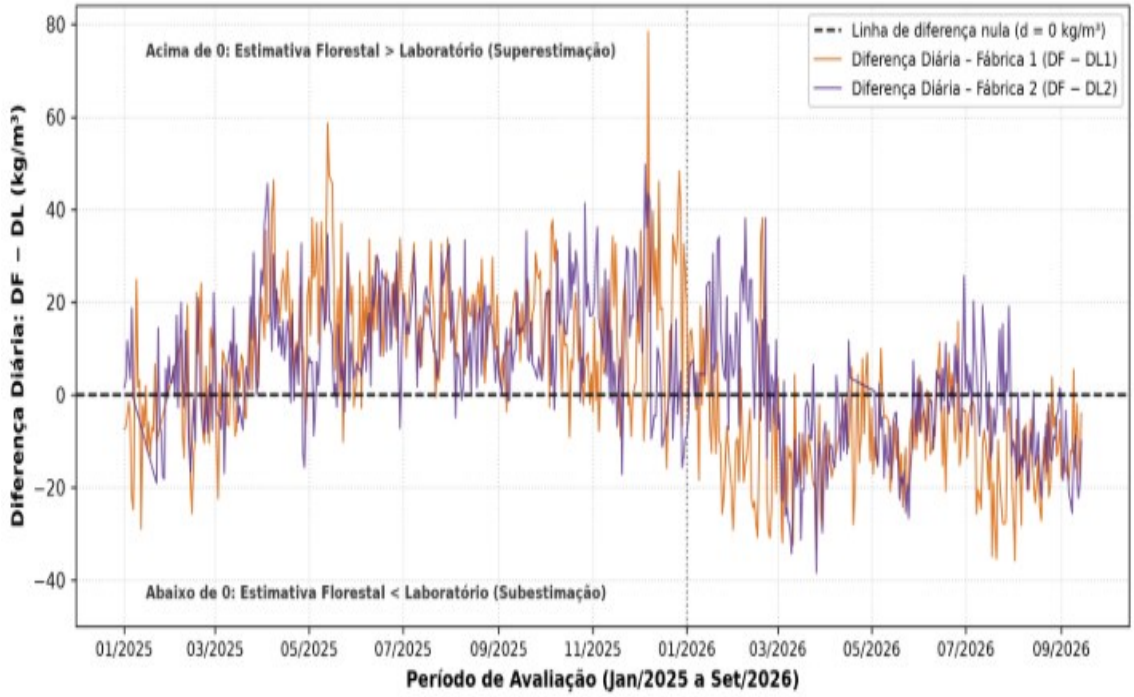
Em 2025, as médias laboratoriais foram inferiores às florestais, enquanto, em 2026, apresentaram valores superiores, resultando em diferenças médias positivas no período total de +3,31 kg/m³ para a Fábrica 1 e +4,86 kg/m³ para a Fábrica 2. Entretanto, os valores de Erro Médio Absoluto (EMA), de 14,89 kg/m³ e 12,46 kg/m³, respectivamente, evidenciam que a proximidade das médias globais não representa necessariamente proximidade entre os registros individuais. Ressalta-se que, como não existe pareamento físico inequívoco por lote, as

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

discrepâncias calculadas correspondem à comparação entre registros coincidentes por data, não constituindo uma avaliação direta da diferença entre medições do mesmo material. Assim, os resultados devem ser interpretados como diferenças entre bases de dados, não como erros de medição individuais ou vieses metrológicos comprovados.

Para avaliar de forma direta a concordância entre os métodos e o comportamento das discrepâncias ao longo do tempo, a Figura 3 apresenta a evolução temporal das diferenças diárias ($d_i = DF_i - DL_i$) para a Fábrica 1 e para a Fábrica 2 em relação à linha de diferença nula (d = 0 kg/m³).

Figura 3. Evolução temporal das diferenças diárias (DF - DL) da densidade básica da madeira nas Fábricas 1 e 2 (jan./2025 a set./2026)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A inspeção da Figura 3 permite identificar claramente o momento em que as diferenças mudaram de sinal e o comportamento distinto entre os dois anos. Entre março e dezembro de 2025, ambas as séries permaneceram predominantemente acima da linha de referência zero, evidenciando um período prolongado em que a estimativa florestal esteve sistematicamente acima da determinação laboratorial (diferença média de +13,32 kg/m³ na Fábrica 1 e de +10,75 kg/m³ na Fábrica 2). Já no primeiro trimestre de 2026 (especialmente a partir de fevereiro na Fábrica 1 e de março na Fábrica 2), observa-se a inversão de sinal das curvas, que passaram a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

oscilar majoritariamente no campo negativo, indicando que a estimativa florestal passou a subestimar a densidade medida no laboratório (diferença média de −10,37 kg/m³ na Fábrica 1 e de −3,63 kg/m³ na Fábrica 2). Esse padrão sugere que as divergências não se restringem a oscilações aleatórias diárias, refletindo mudanças de patamar nos resultados laboratoriais, possivelmente associadas a alterações na composição dos lotes abastecidos (clones, idades de corte ou regiões de colheita entre 2025 e 2026), que não foram acompanhadas por variações correspondentes nas projeções estáticas da base florestal.

Considerando a Equação 2, com rendimento *Rd* de 52% e perdas operacionais de 2,0%, a densidade básica média estimada pela área florestal para o ano de 2025, de 483,46 kg/m³, permite calcular o consumo específico de madeira esperado, conforme apresentado a seguir:

$$CEMesperado = \frac{1}{0{,}48346\ x\ 0{,}52\ x\ (1 - 0{,}02)} = 4{,}059\ m^3/tsa.$$

Contudo, ao considerar a densidade básica média efetivamente determinada pelo laboratório na Fábrica 1 em 2025 (470,14 kg/m³), o consumo específico de madeira calculado passa a ser:

$$CEMreal = \frac{1}{0{,}47014\ x\ 0{,}52\ x\ (1 - 0{,}02)} = 4{,}174\ m^3/tsa.$$

Verifica-se, sob essas premissas de simulação, que a diferença média, correspondente a +13,32 kg/m³ (equivalente a uma diferença relativa de 2,76% na densidade básica estimada), representa um acréscimo de aproximadamente 0,115 m³ de madeira por tonelada de celulose produzida, o que representa um aumento de 2,83% no volume de madeira demandado (CEM) em relação ao previsto pela estimativa florestal. Em uma análise complementar de sensibilidade, fazendo variar o rendimento depurado (*Rd*) entre 50,0% e 54,0% (mantidas as perdas em 2,0%), a diferença relativa no CEM permanece exatamente em +2,83% pela proporcionalidade inversa da Equação 2, correspondendo a acréscimos absolutos simulados entre 0,111 m³/tsa (para *Rd* = 54,0%) e 0,120 m³/tsa (para *Rd* = 50,0%). Ressalta-se que esses valores constituem estritamente resultados de simulação matemática sob condições *ceteris paribus*, e não variações de consumo industrial efetivamente medidas na planta, mas demonstram a relevância gerencial do alinhamento entre as informações florestais e laboratoriais para o planejamento do suprimento e da dosagem de licor branco nos digestores.

4.2. Análise documental e investigação de causas potenciais

Para investigar os fatores operacionais associados às discrepâncias quantificadas na seção anterior, realizou-se o confronto documental entre as diretrizes de inventário pré-colheita fornecidas pelo setor de planejamento florestal, o Procedimento Operacional Padrão utilizado pelo laboratório industrial (PO.11.00.0231, baseado na ABNT NBR 11941) e os parâmetros de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

registro nos sistemas *LIMS* e *PI*. O Quadro 1 sintetiza as diferenças metodológicas e operacionais identificadas nessa análise documental, bem como suas implicações para a comparabilidade dos dados.

Quadro 1. Comparação metodológica e operacional entre a estimativa florestal e a determinação laboratorial

Critério de Comparação	Procedimento de Inventário Florestal	Procedimento Laboratorial Industrial (PO.11.00.0231)	Implicação Potencial na Comparabilidade
Princípio de medição	Indireto em campo (penetração de pino de aço via Pilodyn no DAP a 1,30 m) combinado com modelos preditivos.	Físico-hidrostático direto em amostra composta diária de cavacos da tora comercial inteira.	Leitura superficial no DAP não captura diretamente o cerne interno nem a variação longitudinal base-topo da árvore.
Saturação e secagem	Medição na árvore em pé em condição de umidade de campo; calibração prévia com amostras de referência.	Saturação forçada em autoclave (acima do PSF) e secagem em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante.	Diferença no estado físico de saturação e sensibilidade operacional à etapa de drenagem superficial pós-autoclave.
Frequência e unidade	Projeção suavizada por talhão/bloco de colheita reportada em kg/m³.	Ensaio diário sobre amostra composta do lote picado reportado em g/cm³.	Amortecimento estatístico na estimativa florestal (CV = 1,15%) versus variação diária do mix no pátio (CV de 3,04% a 3,67%).

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A comparação sistematizada no Quadro 1 evidencia que as duas áreas medem o mesmo parâmetro físico sob condições operacionais e escalas amostrais distintas. Enquanto o inventário florestal realiza uma estimativa indireta na árvore em pé, restrita à penetração superficial de um pino na altura do DAP (1,30 m), o laboratório avalia diretamente os cavacos provenientes da tora inteira picada após saturação em autoclave e secagem em estufa a 105 ± 2 °C (PO.11.00.0231).

Observa-se ainda uma assimetria temporal e de registro: a floresta gera projeções suavizadas por talhão em kg/m³, ao passo que o laboratório analisa amostras compostas diárias na entrada dos digestores e registra os resultados em g/cm³ no sistema LIMS.

Essas diferenças estruturais de método, representatividade da árvore e frequência de coleta explicam por que a série florestal permanece estável enquanto os dados laboratoriais refletem as oscilações diárias do processo.

A partir das lacunas identificadas na análise documental (Quadro 1) e da realização de um *brainstorming* técnico com profissionais atuantes na rotina do laboratório industrial e na interface de suprimento florestal, foram levantadas 18 subcausas potenciais para as divergências

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

observadas. Essas subcausas foram organizadas nas seis categorias operacionais (6M) do Diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 4.

Figura 4. Diagrama de Ishikawa dos fatores potencialmente associados às discrepâncias entre as estimativas florestais e os registros laboratoriais de densidade básica da madeira



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O Diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 4 demonstra que as discrepâncias entre as estimativas florestais e os resultados laboratoriais não decorrem de uma falha isolada, mas da interação entre os seis fatores operacionais (6M). Nos eixos de Método e Material, destacam-se a limitação da medição pontual no DAP frente à variabilidade longitudinal da árvore (base–topo) e a mistura de diferentes clones, idades e tempos de estocagem nas pilhas do pátio de madeira. Já nos eixos de Medida, Mão de Obra e Máquina/Sistema, sobressaem as incertezas operacionais na etapa manual de quarteamento e de retirada do excesso de água superficial dos cavacos após a autoclave, além da ausência de integração automática e de padronização de unidades entre a base de planejamento florestal e o sistema laboratorial LIMS.

4.3. Priorização das causas e plano de ação proposto

Para hierarquizar as hipóteses levantadas no brainstorming e estabelecer prioridades de intervenção, todas as 18 subcausas mapeadas nas seis categorias do Diagrama de Ishikawa (Figura 4) foram avaliadas por meio da Matriz GUT (Quadro 2). Os pesos de 1 a 5 para Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T) foram atribuídos em consenso técnico com os profissionais

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

consultados na rotina operacional, ponderando-se o impacto direto de cada fator sobre a diferença média anual observada nos dados, a repercussão no cálculo do Consumo Específico de Madeira (CEM) e a capacidade de intervenção gerencial da indústria.

Quadro 2. Matriz de Priorização GUT para as causas identificadas

Categoria 6M	Subcausa potencial identificada no Diagrama de Ishikawa	G	U	T	GUT (G × U × T)	Soma da Categoria
Método	Modelos preditivos florestais sem recalibração periódica	5	5	5	125	
Método	Amostragem no DAP (1,30 m) vs. tora inteira picada	5	4	5	100	**305**
Método	Saturação em autoclave vs. medição indireta em campo	4	4	5	80	
Máquina/Sistema	Falta de integração entre base florestal e LIMS	5	4	5	100	
Máquina/Sistema	Ausência de trava para valores atípicos no LIMS	4	4	3	48	**175**
Máquina/Sistema	Calibração da mola do Pilodyn e da autoclave	3	3	3	27	
Medida	Sensibilidade na drenagem superficial pós-autoclave	4	4	4	64	
Medida	Frequência amostral distinta (por talhão vs. diária)	4	4	4	64	**164**

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Medida	Unidades distintas (kg/m³ vs. g/cm³)	3	4	3	36	
Mão de Obra	Falta de rotina conjunta de reconciliação de dados	4	4	4	64	
Mão de Obra	Diferenças no quarteamento e drenagem entre turnos	4	3	4	48	**139**
Mão de Obra	Variação operacional no disparo do Pilodyn	3	3	3	27	
Material	Mistura de clones e idades no pátio de madeira	4	3	4	48	
Material	Variação longitudinal (base-topo) da árvore	3	3	4	36	**111**
Material	Variação de umidade e granulometria dos cavacos	3	3	3	27	
Meio Ambiente	Tempo de estocagem da madeira em pilha no pátio	4	3	4	48	
Meio Ambiente	Sazonalidade climática (chuvas vs. estiagem)	3	2	3	18	**84**
Meio Ambiente	Condições edafoclimáticas distintas entre talhões	3	2	3	18	

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise dos resultados da Matriz GUT (Quadro 2) evidencia que a categoria Método apresentou a maior pontuação acumulada na priorização GUT entre as categorias avaliadas, acumulando 305 pontos. Dentro dessa categoria, a hipótese relativa à ausência de recalibração periódica dos modelos preditivos florestais apresentou a maior pontuação individual na Matriz GUT (125 pontos), seguida pela diferença estrutural de representatividade entre a amostragem pontual na altura do DAP (1,30 m) e a análise de cavacos da tora inteira picada (100 pontos), e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

pela divergência física entre a medição indireta em campo e o ensaio após saturação forçada em autoclave (80 pontos). Na sequência de criticidade global, destacaram-se as categorias Máquina/Sistema (175 pontos, impulsionada pela falta de integração e rastreabilidade de lotes entre a base florestal e o LIMS, com 100 pontos) e Medida (164 pontos, puxada pela sensibilidade na drenagem superficial pós-autoclave e pela diferença de frequência amostral, ambas com 64 pontos). As categorias Material (111 pontos) e Meio Ambiente (84 pontos) obtiveram menor pontuação relativa por envolverem características intrínsecas à madeira e ao clima, sobre as quais a atuação gerencial direta é mais restrita. Ademais, mesmo diante de eventuais variações de ±1 ponto nas notas atribuídas pelos especialistas, a categoria Método mantém ampla margem sobre as demais, confirmando a estabilidade de sua priorização.

Com base na priorização das subcausas relacionadas à categoria Método na Matriz GUT, estruturou-se, no Quadro 3, um plano de ação propositivo utilizando a ferramenta 5W2H.

Quadro 3. Plano de ação proposto (5W2H) direcionado à categoria mais crítica identificada na Matriz GUT (Método)

***What* (O quê)**	***Why* (Por quê)**	***Where* (Onde)**	***When* (Quando)**	***Who* (Quem)**	***How* (Como)**	***How much* (Quanto)**
1. Rotina de avaliação e recalibração periódica dos modelos preditivos florestais (Subcausa 1 – GUT 125)	Reduzir a defasagem das estimativas florestais frente às mudanças de patamar da madeira processada e aprimorar a previsibilidade da densidade utilizada no planejamento do CEM.	Planejamento Florestal e Qualidade Industrial.	Ciclo semestral.	Equipes de Inventário Florestal e Engenharia de Processos.	Desenvolver protocolo semestral de validação e atualização das equações preditivas do *Pilodyn* utilizando resultados laboratoriais de campanhas com lotes de origem e tempo de pátio rastreados, recalibrando os coeficientes por estrato clonal quando identificados desvios sistemáticos.	Sem desembolso adicional direto (alocação de horas técnicas internas).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2. Fator de correção longitudinal (DAP vs. árvore inteira) por classe de clone e idade (Subcausa 2 – GUT 100)	Mitigar a diferença sistemática de representatividade entre a leitura superficial a 1,30 m (DAP) e a densidade média real dos cavacos da tora comercial inteira.	Inventário Florestal e Pátio de Madeira.	Prazo de 6 meses (campanhas semestrais).	Pesquisa/Inventário Florestal e Laboratório Industrial.	Realizar campanhas de amostragem pareada coletando discos ao longo do fuste (base, DAP, meio e topo) e cavacos de lotes rastreados dos principais clones comerciais para incorporar fatores de ajuste longitudinal nas equações de inventário.	Baixo custo operacional (amostragem integrada à colheita comercial).
3. Protocolo de reconciliação metodológica (campo vs. autoclave) e padronização do PO.11.00.0231 (Subcausa 3 – GUT 80)	Compatibilizar os critérios de comparação entre a leitura indireta em campo e o método hidrostático pós-autoclave e reduzir a dispersão operacional no laboratório.	Laboratório Industrial (Fábricas 1 e 2) e Inventário Florestal.	Prazo de 60 dias.	Coordenação e Analistas de Laboratório e Equipe Florestal.	Padronizar o tempo de drenagem superficial pós-autoclave e o procedimento de quarteamento no PO.11.00.0231, realizar ensaios de intercomparação em amostras pareadas de referência e parametrizar limites de alerta estatístico no sistema LIMS.	Baixo custo operacional (treinamento interno e parametrização no LIMS).

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O plano de ação apresentado no Quadro 3 concentra os esforços gerenciais nas três subcausas do eixo Método, apontado como a categoria considerada prioritária para intervenção segundo os critérios da Matriz GUT. A primeira iniciativa trata diretamente a subcausa de maior pontuação (125 pontos), estabelecendo um ciclo semestral de verificação e atualização estatística dos modelos preditivos florestais a partir de lotes com rastreabilidade assegurada entre o talhão colhido e a análise no LIMS. A segunda ação atua sobre a limitação espacial da medição no DAP (100 pontos), propondo campanhas de amostragem ao longo do tronco (base–topo) para calibrar a relação entre a leitura superficial a 1,30 m e a densidade média da tora inteira picada. Por fim, a terceira iniciativa aborda a diferença de princípio físico entre a leitura em campo e o ensaio hidrostático pós-autoclave (80 pontos), aliando a padronização da etapa crítica de drenagem superficial no procedimento PO.11.00.0231 a ensaios de intercomparação em amostras de referência. Ressalta-se que as ações propostas priorizam intervenções de baixo custo e compõem um roteiro técnico propositivo, cuja efetividade prática deverá ser mensurada em ciclos futuros de implementação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar as discrepâncias entre as estimativas florestais e as determinações laboratoriais da densidade básica da madeira em uma indústria de celulose Kraft localizada em Três Lagoas (MS), por meio da aplicação integrada de ferramentas estatísticas e de gestão da qualidade. A análise da série histórica de 21 meses, associada à avaliação documental dos procedimentos operacionais das áreas florestal e industrial, permitiu caracterizar o comportamento das bases de dados, quantificar as divergências diárias e anuais e estruturar um plano de ação direcionado aos fatores mais críticos identificados.

Em relação ao primeiro objetivo específico, voltado à caracterização das bases de dados florestal e industrial, verificou-se que as estimativas florestais apresentaram baixa dispersão no período consolidado, com média de 482,69 kg/m³, desvio-padrão de 5,54 kg/m³ e coeficiente de variação de 1,15%. Em contrapartida, os registros laboratoriais apresentaram maior variabilidade diária, com desvio-padrão de 17,60 kg/m³ na Fábrica 1 e de 14,51 kg/m³ na Fábrica 2, além da presença de uma observação atípica inferior (409,00 kg/m³ na Fábrica 1), cuja análise de sensibilidade comprovou não alterar significativamente as medidas de tendência central e dispersão. A estratificação anual revelou ainda que o desvio-padrão global da Fábrica 1 estava influenciado pela elevação expressiva do patamar médio laboratorial de 2025 (470,14 kg/m³) para 2026 (492,42 kg/m³), fenômeno também observado na Fábrica 2 (472,35 kg/m³ em 2025 para 485,60 kg/m³ em 2026), enquanto a estimativa florestal manteve-se praticamente inalterada entre os anos.

Quanto ao segundo objetivo específico, relacionado à investigação de padrões de variação e diferenças entre os registros, a análise temporal demonstrou que as diferenças médias globais (+3,31 kg/m³ na Fábrica 1 e +4,86 kg/m³ na Fábrica 2) resultaram da compensação matemática entre comportamentos opostos: em 2025, as estimativas florestais superaram as médias laboratoriais (+13,32 kg/m³ na Fábrica 1 e +10,75 kg/m³ na Fábrica 2), ao passo que, em 2026, passaram a subestimá-las (−10,37 kg/m³ e −3,63 kg/m³, respectivamente). Os valores de Erro Médio Absoluto (EMA), de 14,89 kg/m³ na Fábrica 1 e 12,46 kg/m³ na Fábrica 2, evidenciaram afastamentos diários relevantes, cujo impacto simulado, considerando a diferença média entre os registros observada em 2025 na Fábrica 1, correspondeu a um acréscimo de 0,115 m³/tsa (+2,83%) no Consumo Específico de Madeira (CEM). Ressalta-se que esses resultados se referem a comparações temporais entre registros coincidentes por data, não constituindo avaliação direta de medições sobre o mesmo lote físico.

No atendimento ao terceiro e ao quarto objetivos específicos, a análise comparativa dos procedimentos e o mapeamento pelo Diagrama de Ishikawa permitiram levantar 18 subcausas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

potenciais distribuídas nos 6M. A priorização dessas 18 subcausas por meio da Matriz GUT apontou a categoria Método como a considerada prioritária na avaliação gerencial (305 pontos acumulados), seguida por Máquina/Sistema (175 pontos) e Medida (164 pontos). Com base nessa priorização, elaborou-se um plano de ação propositivo estruturado pela ferramenta 5W2H voltado à categoria considerada prioritária, contemplando a rotina de avaliação e recalibração periódica dos modelos preditivos florestais com lotes rastreados, o ajuste longitudinal entre a leitura no DAP (1,30 m) e a tora inteira picada, e a padronização operacional e reconciliação entre as medições de campo e o ensaio hidrostático pós-autoclave (PO.11.00.0231).

Como limitações do estudo, destacam-se a inexistência de pareamento físico inequívoco entre os lotes avaliados no campo e os cavacos analisados no laboratório em cada data, a ausência de metadados individualizados por clone, idade e tempo de estocagem vinculados aos registros diários do LIMS, e o caráter propositivo do plano 5W2H, cujas ações ainda não foram implementadas nem validadas experimentalmente. Para investigações futuras, recomenda-se: (i) conduzir estudos de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) do sistema de medição tanto na operação do Pilodyn quanto na drenagem e pesagem hidrostática pós-autoclave; (ii) realizar análises de concordância entre métodos utilizando amostras efetivamente pareadas e lotes com rastreabilidade digital desde o talhão até o digestor; (iii) implementar cartas de Controle Estatístico de Processo (CEP) para monitoramento contínuo das diferenças; e (iv) desenvolver modelos de recalibração dinâmica que incorporem variáveis explicativas como clone, idade de corte, procedência edafoclimática, tempo de estocagem em pátio e proporção da mistura de madeira. Conclui-se que a aplicação combinada de estatística descritiva e ferramentas da qualidade mostrou-se promissora para estruturar o diagnóstico e orientar propostas de melhoria na interface floresta-indústria, estabelecendo bases técnicas para aumentar a previsibilidade no planejamento e no controle do processo de produção de celulose.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11941: **Madeira – Determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BUSSAB, Wilton de Oliveira; MORETTIN, Pedro Alberto. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. **Gestão da qualidade: conceitos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

FALCONI, Vicente Campos. **TQC: Controle da qualidade total (no estilo japonês)**. 9. ed. Nova Lima: Falconi Consultores, 2014.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

FOELKEL, Celso. **O consumo específico de madeira por tonelada de celulose sem branqueamento e branqueada**. *Eucalyptus* Newsletter, Piracicaba, n. 25, p. 1-28, 2009. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/newspt_agosto09.html. Acesso em: 17 ago. 2026.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOMIDE, José Lívio; FANTUZZI NETO, Humberto; REGAZZI, Adair José. **Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft**. Revista Árvore, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 339-344, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000200017. Acesso em: 17 ago. 2026.

GOUVÊA, Adriana de Fátima Gomes *et al.* **Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos.** Revista Árvore, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000200019. Acesso em: 17 ago. 2026.

GREAVES, B. L.; BORRALHO, N. M. G.; RAYMOND, C. A.; EVANS, R.; WHITEMAN, P. **Age-age correlations in, and relationships between basic density and Pilodyn penetration in *Eucalyptus nitens***. Silvae Genetica, Frankfurt, v. 45, n. 5-6, p. 302-306, 1996.

GULLICHSEN, Johan; FOGELHOLM, Carl-Johan. **Chemical pulping**. Helsinki: Fapet Oy, 2000.

GY, Pierre. **Sampling for analytical purposes**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.

HARDNER, Craig; BIRD, Michael; HEBERLING, Monica; GORE, Peter. **Genetic parameter estimates for *Eucalyptus dunnii* wood properties assessed by multiple methods. Agr**ociencia Uruguay, Montevideo, v. 27, e1318, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.31285/AGRO.27.1318. Acesso em: 17 ago. 2026.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual IBÁ 2024. São Paulo: IBÁ, 2024. Disponível em: https://iba.org/publicacoes/relatorios. Acesso em: 17 ago. 2026.

ISHIKAWA, Kaoru. **What is total quality control? The Japanese way**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.

JURAN, Joseph M.; GODFREY, A. Blanton**. Juran's quality handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

KEPNER, Charles H.; TREGOE, Benjamin B. **O administrador racional**. São Paulo: Atlas, 1981.

KOLLMANN, Franz F. P.; CÔTÉ, Wilfred A. **Principles of wood science and technology.** Berlin: Springer-Verlag, 1968.

LIMA, Michael Douglas Roque *et al.* **Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus***. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 48, n. 128, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04. Acesso em: 17 ago. 2026.

LOBÃO, Moisés Silveira; LÚCIA, Ricardo Marius Della; MOREIRA, Márcio Sampaio Sarmet; GOMES, Adriana. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de**

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eucalipto com diferentes densidades. Revista Árvore, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600014. Acesso em: 17 ago. 2026.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

MORAES, Francisco de Assis Bertini; PIRATELLI, Claudio Luis; ACHCAR, Jorge Alberto. **Condições ideais para o consumo específico de madeira na produção de celulose**. Production, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 712-724, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-65132013005000074. Acesso em: 17 ago. 2026.

OLIVEIRA, Rogério Antonio de; BATISTELA, Gislaine Cristina; SIMÕES, Danilo; PADOVANI, Carlos Roberto**. Aplicação de modelos lineares de efeitos mistos para avaliar a densidade básica da madeira de duas espécies e um híbrido de *Eucalyptus*.** Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 49, n. 129, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.03. Acesso em: 17 ago. 2026.

QUEIROZ, Simone Cristina Setúbal; GOMIDE, José Lívio; COLODETTE, Jorge Luiz; OLIVEIRA, Rubens Chaves de. **Influência da densidade básica da madeira do híbrido *Eucalyptus* grandis x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa Kraft**. Revista Árvore, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600016. Acesso em: 3 set. 2026.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD TESTING COMMITTEE (SCAN). SCAN-CM 43:95: *Wood chips for pulp production – Basic densit*y. Stockholm: SCAN, 1995.

SMOOK, Gary A. Handbook for pulp & paper technologists. 4. ed. Atlanta: TAPPI Press, 2016.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI). TAPPI T 236 om-13**: Kappa number of pulp**. Atlanta: TAPPI Press, 2016.

TUKEY, John W. **Exploratory data analysis.** Reading: Addison-Wesley, 1977.

WERKEMA, Cristina. **Métodos estatísticos básicos para a melhoria de processos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.