

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

RAMON FERREIRA OLIVEIRA

DENSIDADE DA MADEIRA JOVEM DE EUCALIPTO ESTIMADA POR
RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO PARCIAL

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2019

RAMON FERREIRA OLIVEIRA

DENSIDADE DA MADEIRA JOVEM DE EUCALIPTO ESTIMADA POR
RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO PARCIAL

Monografia apresentada ao
Departamento de Ciências
Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro
Industrial Madeireiro.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2019

RAMON FERREIRA OLIVEIRA

DENSIDADE DA MADEIRA JOVEM DE EUCALIPTO ESTIMADA POR
RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO PARCIAL

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 04 de dezembro de 2019

COMISSÃO EXAMINADORA

João Gabriel Missia da Silva

Prof. D.Sc. João Gabriel Missia da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Graziela Baptista Vidaurre

Profª. D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre
Universidade Federal do Espírito Santo
Conselheira

Carla da Costa Garcia

M.Sc. Carla da Costa Garcia
Veracel Celulose S.A.

Jéferson Pereira Martins Silva

M.Sc. Jéferson Pereira Martins Silva
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sabedoria diária para superar os desafios, e por todas as graças e bênçãos que tem derramado sobre minha vida.

À UFES, em oportunizar o curso de graduação em Engenharia Industrial Madeireira, mantendo toda a estrutura do Campus Alegre e do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira que me possibilitaram concluir uma graduação de qualidade.

À empresa Veracel Celulose S.A, por doar material e provir as condições para realização deste trabalho. Em especial, a pesquisadora Carla Garcia por apoiar e se disponibilizar quando foi necessário. Ao Enedio Neto, Flavio Soares, Edson Martins e Reni Lago pelo esforço e comprometimento de auxiliar na coleta em campo.

Aos meus pais, Gelcio e Sirlânia que são meu referencial de excelência como pais, cidadãos e profissionais, pois sabem da importância da educação e me permitiram ter o acesso a esta, suprimindo todas minhas necessidades, além de sempre me instruírem a seguir o melhor caminho na minha vida pessoal e profissional.

Aos meus irmãos, Raphael e Renan que sempre compartilharam ótimos momentos de vida, e serão meus melhores companheiros para toda vida.

À toda minha família, por dar o suporte com conversas, conselhos e mensagens, entendendo a minha distância para realizar um sonho e não fazer disso um empecilho para estarem presentes na minha vida.

Aos amigos e orientadores João Gabriel Silva e Graziela Vidaurre, por me acompanharem em toda a minha formação, pelos ensinamentos, conselhos e experiências que foram cruciais para o meu aprimoramento profissional.

À Elbya Gibson, pelo companheirismo, amizade, conselhos e excelentes momentos juntos que me fizeram crescer pessoal e profissionalmente.

Ao João Gabriel Silva, Stéffany Araujo, Sofia Rocha, Tais Moreira, Jeferson Silva e Elbya Gibson, pelo auxílio na realização da coleta, análises, criação de figuras, tabelas e sugestões que contribuíram para o trabalho.

Ao Marceneiro Elecy Palácio e ao técnico José Geraldo Oliveira, pela boa vontade, ensinamentos e auxílios no preparo de amostras e realização de análises.

Aos amigos do NUQMAD e LEMAD, Alexa Melo, Alice Brito, Ana Carla Lima, Ana Paula Silva, Camila Souza, Daiana Jesus, Daniela Minini, Jaily Andrade, Jean Oliveira, Joyce Pinto, Leonor Mastela, Lourdes Santos, Lucas Moulin, Maria Almeida, Nayara Lopes, Raynord Mayard, Sofia Rocha e Vinícius Taquetti pelas boas trocas de experiências e por sempre tornarem harmoniosos os ambientes de trabalho.

Aos Professores, Ananias Junior, Djeison Batista, Fabrício Gonçalves, Jordão Moulin, José Tarcísio, Juarez Paes, Humberto Neto, Michel Oliveira, Pedro Segundinho, Rejane Alves e Wendel Andrade pelos incentivos, instruções e exemplos profissionais que contribuíram com a minha formação.

Aos amigos de república, Eduardo Grasse, Nilton Amaral, Phillipe Dangelo, Saulo Gonçalves, Flavio Carmo, Pedro Neto, Leandro Santos, Felipe Silva pela amizade, convívio diário e por compartilhar ótimos momentos.

Aos amigos do G.C., Thiago Macedo, Sofia Rocha, Tais Moreira, Jeferson Silva, Kaíse Souza, Rita Carvalho, Genilda Amaral, Henrique Ramalho, Emanuel Araújo, Francielly Oliveira, Evandro Silva e Jeangelis Santos pelo último ano incrível de amizade e companheirismo.

Aos amigos do curso, José Paulo Mendonça, Gean Carreiro, Alexa Melo, Vinicius Schiavo, Giovanni Satler e Mariana Suuchi, Gabriel Zuqui, Fernanda Catein, Flavia Souza, Natália Cunha que partilharam comigo muitos momentos de aprendizado dentro e fora de sala de aula, realizando trabalhos, estudando e socializando.

Aos amigos da UFPR, Leonardo Rosa, Gustavo Silveira, Guilherme Neto, Gustavo Hanashiro, Jhonny Negoseki, Neiva Rodrigues, Isabela Rodrigues, Otavio Bertoli, Gustavo Misael e Angélica Pagliarini, pela amizade, bons momentos e por terem sido acolhedores e prestativos.

RESUMO

A densidade da madeira é uma propriedade muito utilizada pelas empresas florestais e pesquisadores como indicador de sua utilização. A utilização de métodos não destrutivos, eficazes e precisos como a resistografia para predição da densidade básica são necessários para conferir rapidez nas análises e auxílio na tomada de decisão. Portanto, o presente estudo objetivou-se estimar a densidade básica da madeira de árvores de clones de eucalipto, em idades e sítios distintos, em diferentes profundidades de perfuração da haste do resistógrafo. Foram avaliadas 160 árvores de dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, nas idades de 3 e 5 anos, em dois locais da empresa Veracel Celulose S.A. As mensurações de resistência à perfuração das árvores foram obtidas por meio da utilização do RESISTOGRAPH® R650-SC. Foram gerados e validados modelos de regressão de DB x RP por meio do *software R*. Observou-se o incremento da densidade básica de 3 para 5 anos, as melhores correlações de DB x RP nos primeiros 5 cm e a perfuração do raio como a mais efetiva, bem como a aplicação de modelos genéricos, para predição da densidade básica. Ajustou-se um modelo genérico mais preciso, para aplicação nas atividades da empresa, com a adição do produto da idade com o valor de RP do primeiro centímetro de perfuração. A resistografia possibilitou a predição da densidade básica abrangendo a variação de idade, clone e local, com baixo erro na estimativa, sendo uma boa alternativa para utilização nas atividades industriais e de programas de melhoramento.

Palavras-chave: *Eucalyptus*. Densidade da madeira. Resistógrafo. Otimização da perfuração. Estimativa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O problema e sua importância.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Densidade da madeira: variabilidade e métodos.....	4
2.2 Resistência à perfuração (<i>Drilling resistance</i>)	6
3 METODOLOGIA.....	9
3.1 Descrição do local	9
3.2 Seleção das árvores em campo e amostragem	10
3.3 Resistência à perfuração (RP) da haste do resistógrafo	11
3.4 Densidade básica da madeira	13
3.5 Ajuste e validação dos modelos de regressão	13
4. RESULTADOS	16
5. DISCUSSÃO	24
6. CONCLUSÃO.....	26
7. CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	27
8. REFERÊNCIAS.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Referência das estratégias abordadas	14
Tabela 2 – Valores médios da Resistência à perfuração (RP) e Densidade básica (DB) radial da madeira dos clones de <i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> por idade e local de crescimento	16
Tabela 3 – Modelos de regressão ajustados e validados de acordo com as estratégias	19
Tabela 4 – Densidade básica estimada pela resistência à perfuração parcial (raio casca-medula) na amostragem destrutiva (40 árvores) e não destrutiva (120 árvores em pé)	21
Tabela 5 – Densidade básica estimada pela resistência à perfuração periférica (primeiros 5 cm da casca) na amostragem destrutiva (40 árvores) e não destrutiva (120 árvores em pé)	22

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Equipamentos que utilizam a metodologia de resistência à perfuração (Drilling Resistance) 7
- Figura 2 – Mapa dos talhões comerciais e informações de altitude, precipitação e tipo de solo dos locais estudados e de idade, diâmetro (DAP_m) e densidade básica (DB_m) da madeira dos materiais genéticos10
- Figura 3 – Fluxograma das etapas de coleta, processamento e análise de dados, geração de resultados e aplicação 12
- Figura 4 – Exclusão dos pontos de resistência à perfuração, através do software EXCEL® 13
- Figura 5 – Metodologia de validação leave one out 15
- Figura 6 – Medidas de precisão da estimativa da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (idades e locais de crescimento distintos) por profundidade de perfuração radial - casca a medula 17
- Figura 7 – Medidas de precisão da estimativa da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* (idades e locais de crescimento distintos) por profundidade de perfuração periférica – primeiros 5 cm da casca 18
- Figura 8 – Gráficos de dispersão da regressão, ajuste do modelo e validação dos principais modelos 20
- Figura 9 – Gráficos de dispersão da densidade básica observada e estimada por resistência à perfuração e distribuição gráfica dos resíduos dos modelos Total Raio, Total 5 cm e Total Raio+idade*RP1..... 23

1 INTRODUÇÃO

A dinamicidade das indústrias e suas operações florestais impõem a necessidade da obtenção de parâmetros/indicadores da qualidade da madeira em grande escala, acessível em um curto período de tempo e com menor custo. A densidade básica é uma variável que pode ser indicada devido a sua fácil determinação, por apresentar correlação com as demais propriedades da madeira e pela influência nos processos operacionais (GANTZ, 2002; CHAUHAN et al., 2006; OLIVEIRA, 2007; DIAS et al., 2017).

A existência de métodos rápidos, confiáveis e não-destrutivos na determinação da densidade da madeira, pode resultar em expressivos ganhos econômicos e em tempo de análise (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017). Entre os métodos não destrutivos que podem ser usados na avaliação da qualidade da madeira, está a utilização do equipamento resistógrafo. Esse equipamento tem grande potencial na avaliação de árvores em campo, devido a sua modernização com a utilização de componentes mais leves permitindo maior portabilidade, o aprimoramento da durabilidade da bateria, além dos avanços nas pesquisas, com modelos de estimativa de densidade por resistografia (RINN, 2012; DIAS et al., 2017; OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017; DOWNES et al., 2018; FUNDOVA, FUNDA, WU, 2018; KLOPPENBURG, 2018; SHARAPOV et al., 2018b; SILVA, 2019).

Os avanços tecnológicos conferem ao equipamento um longo período de utilização pelo desempenho da sua bateria, ergonomia para o operador, facilidade de transporte e troca da haste, obtenção de resultados rápidos e precisão na estimativa de densidade. Contudo, podem ser identificados alguns “empecilhos” na sua utilização, como: o acúmulo de serragem durante a perfuração (KLOPPENBURG, 2018; SILVA, 2019) que causa o aumento do atrito (LIMA et al., 2007; NUTTO; BIECHELE, 2015; SHARAPOV et al., 2018a) em árvores de grandes diâmetros (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017), e a quantidade de valores de resistência à perfuração (RP) gerados.

A quantidade de valores de RP está relacionado a uma característica positiva do equipamento que é a sua representatividade, capaz de realizar medições a cada 10 μm , visto que ele foi projetado para avaliar a integridade de árvores e componentes estruturais de madeira, justificando essa quantidade de pontos amostrados (LIMA et

al., 2007; CARDIN, 2011). Mas, essa representatividade na avaliação acaba por ser um desafio na estimativa da densidade, pois gera um grande volume de dados que precisam ser minerados, quando se pretende aplicar o equipamento na avaliação de muitas árvores.

1.1 O problema e sua importância

A empresa na qual se realizou este estudo, identificou o potencial de utilização do resistógrafo na seleção de clones de eucalipto, por meio da estimação da densidade da madeira. O equipamento desperta interesse na avaliação de árvores em campo, por ser de fácil manuseio, ergonômico, não destrutivo e pela precisão na leitura. Entretanto, o volume de dados gerados ao perfurar a quantidade de árvores dos testes clonais dificulta o ranqueamento, pois requer uma análise de dados minuciosa que aumenta o tempo de resposta. Necessita-se, então, de uma otimização na utilização do resistógrafo aplicado para esse uso.

Mesmo que a perfuração seja rápida, é necessário realizar uma amostragem correta com número de repetições adequado, pois demanda deslocamento de pessoal, equipamentos e provisões para o trabalho em campo. Logo, não é atrativa a mineração de um grande volume de dados para gerar os indicadores que serão utilizados no ranqueamento de clones em parcelas experimentais após empregar tempo, recurso humano e financeiro para a amostragem em campo.

Além disto, para utilizar o equipamento em parcelas experimentais é necessário investigar as influências de variáveis diversas e distintas, as quais este será submetido, como os locais de crescimento e idades das árvores. Para que assim, seja avaliada a viabilidade técnica de uso do equipamento, abrangendo diferentes materiais sobre a influência de diversos fatores externos.

Portanto, a otimização da utilização do resistógrafo é uma demanda importante para que se possa predizer a densidade com maior rapidez na avaliação de árvores em campo, auxiliando na qualidade da madeira para os mais diversos fins e nos programas de melhoramento.

Assim, esta pesquisa tem como diferencial, investigar se em menores profundidades de perfuração da haste no fuste (com um menor volume de dados) é possível obter boa precisão na estimativa da densidade básica, quando avaliadas em diferentes locais, idades e clones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Estimar a densidade básica da madeira de árvores de clones de eucalipto, em idades e sítios distintos, por profundidades de perfuração parciais da haste do resistógrafo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Ajustar modelos de regressão e determinar a profundidade de perfuração mais eficiente para estimar a densidade básica da madeira em cada idade, clone e ambiente.
- Descrever a aplicabilidade da resistografia parcial na seleção de materiais genéticos;

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Densidade da madeira: variabilidade e métodos

A densidade ou massa específica é uma das propriedades mais importantes da madeira, podendo ser expressa de várias formas, como: aparente, básica e anidra (OLIVEIRA, 2007). A densidade aparente é definida pela razão entre a massa e o volume das amostras no mesmo teor de umidade [12 % pela NBR 7190 (ABNT, 1997)]. A densidade básica é definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado da amostra [NBR 7190 (ABNT, 1997); NBR 11941 (ABNT, 2003)]. A densidade anidra é definida pela razão entre a massa seca e o volume seco da amostra de madeira.

A densidade, por relacionar a massa e volume da madeira, a uma determinada umidade, é uma propriedade da madeira bastante pesquisada devido a sua importância nos rendimentos dos processos e aplicações industriais (PÁDUA, 2009; DIAS et al., 2017).

Uma amostra de madeira é composta pelo material sólido das paredes celulares e as cavidades celulares que contêm ar, água e outras substâncias em pequenas quantidades, como resinas ou gomas e os extrativos orgânicos e inorgânicos (DINWOODIE, 2004). Toda essa estrutura, em associação com as influências da genética e do local sobre o crescimento das árvores em diferentes períodos, resulta na formação de madeira com variações das características químicas e anatômicas, representadas em sua densidade. Assim, alterações no clima, taxa de crescimento, fertilidade do solo, ocorrência de estresses de crescimento, doenças e pragas e tratamentos silviculturais afetam a densidade da madeira (BRITO, 2017; ROCHA, 2017; BOBADILHA et al., 2018; CÂMARA et al., 2018; ROCHA, 2018).

Em consequência aos diversos fatores influenciadores, a densidade irá variar dentro da árvore, no sentido base-topo e medula-casca, devido a resposta da atividade cambial a esses fatores e pelo amadurecimento do câmbio com o avançar da idade (OLIVEIRA; SILVA, 2003; SHMULSKY; JONES, 2011).

A variação da densidade está intimamente ligada a formação de diferentes dimensões de células, proporção de vasos e teores de extrativos presentes na madeira. Desta forma, porções mais densas são resultantes de fibras de paredes mais espessas, da proporção de lenho tardio nos anéis de crescimento e menor proporção

dos vasos. As alterações na formação das fibras e na morfologia dos vasos (diâmetro e frequência) devido a atividade cambial, também podem resultar em porções menos densas, registradas em menores espessuras de parede das fibras, maior proporção de vasos e do lenho inicial (TOMAZELLO FILHO et al., 2008; SHMULSKY; JONES, 2011).

As tendências de variação da densidade da madeira podem ser diferentes para o eucalipto ao longo da altura e diâmetro, ao avaliar diferentes espécies e idades (PÁDUA, 2009). De modo geral, a densidade tende a aumentar ao longo do diâmetro, mas ocorrem variações não consistentes e dependentes da espécie. No caso de coníferas, a densidade tende a reduzir ao longo do sentido longitudinal, enquanto para os eucaliptos tende a aumentar da base ao topo (DOWNES et al., 1997; OLIVEIRA; SILVA, 2003; LOPES et al. 2011; CARNEIRO, 2017; SILVA, 2019). A fácil determinação e a relação funcional com outras propriedades, inclusive a anisotropia de contração, faz com que a densidade básica seja considerada um importante índice na avaliação da qualidade da madeira para diferentes finalidades (PÁDUA, 2009; BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010). A densidade da madeira afeta os processos de produção e a qualidade final da polpa celulósica e papel, carvão vegetal, produtos sólidos, serrados, painéis e componentes estruturais (DOWNES et al., 1997; WALKER, 2006; BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010)

Ao avaliar a qualidade da madeira não deve-se apenas tomar a densidade como um indicador isolado, pois ela pode não revelar exatamente o comportamento das demais propriedades. Ela apenas amplia e engloba os efeitos de outras características intrínsecas da qualidade, devido a seu método de determinação. Ao ser utilizada como indicador, deve ser tomada em conjunto com uma outra propriedade específica do uso final que se pretende aplicar a madeira (CHAUHAN et al., 2006; PÁDUA, 2009).

Portanto, ao se obter a densidade como indicador de qualidade da madeira para diferentes usos é necessário avaliá-la em um conjunto maior de informações, pois a madeira é oriunda de um processo orgânico variável conforme as diferentes condições submetidas à floresta. Contudo, é uma propriedade importante, pois nas operações industriais auxilia na quantificação de matéria que entra nos processos (seja em massa ou volume), e nos programas de melhoramento é utilizada para a seleção de clones e indicação de possíveis usos (ISIK; LI, 2003; WALKER, 2006; CHAUHAN et al., 2006; CASTRO et al., 2013).

As análises extensas de densidade, que envolvem muitos dados podem ser custosas e geralmente envolvem métodos destrutivos para árvores inteiras, que são precisos, mas demandam muito tempo na realização (GANTZ, 2002). Assim, esses métodos são inviabilizados em programas de melhoramento florestal, pois potencialmente milhares de árvores devem ser analisadas nesses programas e cada repetição pode ser única (GANTZ, 2002; DOWNES et al., 2018).

A avaliação da densidade por um método rápido, confiável e econômico é uma necessidade crescente dos programas de melhoramento, que buscam em métodos não-destrutivos sanar essa necessidade (ISIK; LI, 2003; DOWNES et al., 2018; FUNDOVA; FUNDA; WU, 2018).

Os métodos não destrutivos mais estudados atualmente para determinar a densidade da madeira são: a densitometria de raios X (método direto) e os métodos de resistência à penetração de pino (Pilodyn®), de resistência à perfuração de haste (RESISTOGRAPH®) e a espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), que se configuram como indiretos (GANTZ, 2002; ISIK; LI, 2003; BOUFFIER et al., 2008; PÁDUA, 2009; CALLISTER; ENGLAND, 2010; GOUVÊA et. al., 2011; LAZZAROTTO et al., 2016; DIAS et al., 2017; DOBNER, HUSS, TOMAZELLO FILHO, 2018; DOWNES et al., 2018; ORTEGA RODRIGUEZ; TOMAZELLO FILHO, 2019; SILVA, 2019).

Em geral, quando os métodos não destrutivos são avaliados quanto a sua eficácia e viabilidade, os dados gerados de densidade são comparados com os métodos destrutivos de medida direta, como o método deslocamento em água e, em menor proporção, com a densitometria de raios-X (GANTZ, 2002; BOUFFIER et al., 2008; PÁDUA, 2009; FUNDOVÁ, FUNDA, WU, 2018; JESUS, 2019; SILVA, 2019).

2.2 Resistência à perfuração (*Drilling resistance*)

A metodologia de resistência à perfuração se trata de uma técnica não-destrutiva que permite uma amostragem eficiente e de baixo custo, fundamental na avaliação da qualidade da madeira (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2015; JESUS, 2019). Comercialmente, três equipamentos utilizam essa metodologia, o Resistograph® (Rinntech Ek, Heidelberg, Alemanha) (Figura 1 A), o IML-RESI Systems (IML Instrumenta Mechanik Labor System GmbH, Wiesloch, Alemanha) (Figura 1 B) e uma microsonda digital (Sibert Technology Ltd., Surrey, Inglaterra)

(Figura 1 C), que possuem diferentes capacidades de perfuração e podem ser empregados para a avaliação de árvores em pé, apenas na seção da casca até a medula ou em toda a seção diametral (JESUS, 2019).



Figura 1 – Equipamentos que utilizam a metodologia de resistência à perfuração (Drilling Resistance). A – Resistograph®; B – IML-RESI Systems; C – microsonda digital.

Fonte: O autor (2019), IML INSTRUMENTA MECHANIK LABOR SYSTEM GMBH (2019) e BRICK TIE PRESERVATION (2012).

O resistógrafo é um equipamento desenvolvido para ser robusto, fácil de usar e preciso para detectar defeitos internos na madeira, o qual seu princípio baseia-se na medida da resistência da madeira à perfuração de uma haste, com velocidade de avanço constante, para gerar um gráfico no qual identifica-se a presença dos defeitos (RINN et al, 1996; GANTZ, 2002).

O objetivo inicial da utilização do resistógrafo foi a avaliação em campo da sanidade de postes, árvores e estruturas de madeira (LIMA et al., 2007; CARDIN, 2011). Atualmente ele é utilizado na estimação de densidade de árvores de plantações comerciais e testes clonais, com base na correlação entre a resistência à perfuração e a densidade básica ou a densidade aparente obtida por densitometria de raios-X (RINN et al.,1996; GANTZ, 2002; ISIK; LI, 2003; LIMA et al., 2007; DIAS et al., 2017; DOWNES et al, 2018; JESUS, 2019; SILVA, 2019).

O princípio de funcionamento do equipamento resistógrafo pode ser descrito da seguinte forma: ao iniciar uma perfuração, uma haste de aço com aresta de corte de 3 mm penetra no lenho com velocidade de avanço constante e o equipamento registra em sua memória interna, o consumo de energia eletrônica do motor de rotação da haste que é proporcional ao torque mecânico, para gerar o gráfico de resistência à perfuração (KLOPPENBURG, 2018). Ao atravessar a madeira a haste encontra diferentes intensidades de perfuração que são referentes: a condição estrutural da parede celular, as variações entre lenho inicial e tardio, características de formação

do lenho em resposta às condições ambientais, nós, bolsas de quino, óleo ou resina e regiões apodrecidas ou degradadas (RINN et al., 1996; RINN, 2012; KLOPPENBURG, 2018).

As vantagens de utilização do Resistógrafo são citadas em alguns estudos, como: a possibilidade de analisar árvores de forma não-destrutiva, a portabilidade e a bateria recarregável do equipamento (CARDIN, 2011), a possibilidade de seleção da velocidade de avanço (CERALDI; MORMONE; RUSSO ERMOLLI, 2011) e de avaliar grande número de árvores em pouco tempo (OLIVEIRA; WANG; VIDAURRE, 2017). Destaca-se a possibilidade de utilização do resistógrafo no estudo de árvores matrizes crescidas em áreas de conservação, na seleção de materiais para programas de melhoramento genético e monitoramento da resistência à perfuração ao longo da idade para registro do efeito da idade, espaçamento, tratos silviculturais e ocorrência de pragas e doenças (SILVA, 2019).

Ao estudar a aplicação do equipamento IML Resistograph PD400 na avaliação de aproximadamente 2000 árvores do gênero *Eucalyptus*, Downes et al. (2018) constataram que a resistografia possibilita menor custo para obtenção de informações da densidade básica da madeira, tendo em vista, as medidas de precisão das regressões lineares, com R^2 de 0,66 a 0,87. O estudo de Downes et al. (2018) respalda o uso e aplicação da resistografia à programas de melhoramento que pretendem amostrar um número grande de árvores, mas ainda com a necessidade de aprimorar o processamento dos dados ou uso de *softwares* para deixar essa etapa mais viável.

O potencial do uso do resistógrafo para seleção de materiais genéticos foi constatado por Isik e Li (2003) e Rodrigues et al. (2008). Isik e Li (2003) obtiveram correlações moderadas da densidade com a RP dos materiais genéticos agrupados em comparação as características individuais dos materiais, que foram baixas. Rodrigues et al. (2008) observaram ganhos genéticos indiretos ao selecionar clones pelo uso da RP, ou seja, eles observaram maior precisão na seleção genética utilizando os valores da RP que as simples variáveis fenotípicas.

Um dos principais problemas na utilização do Resistógrafo é o aumento do atrito da haste com a madeira a medida que se estende a distância ou profundidade de perfuração, devido ao cavaco que é gerado e não é expelido para fora da cavidade, como relatado em outros estudos (LIMA et al., 2007; DOWNES et al, 2018; JESUS, 2019; SILVA, 2019). O cavaco aglutina no espaço entre a haste e o diâmetro do furo, o que causa o aumento da RP e interfere na sua relação com a densidade.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do local

Foram avaliadas 160 árvores de dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (Clone 1 e 2), nas idades de 3 e 5 anos, nos locais de crescimento, chamados de A (espaçamento 4 x 3 m) e B (espaçamento 5 x 2,4 m) da empresa Veracel Celulose S.A.

O local A está localizado nos municípios de Eunápolis e Guaratinga – BA, abrangendo os talhões 1, 2, 3 e 4 (Figura 2). O local B está localizado no município de Porto Seguro – BA, abrangendo os talhões 5, 6, 7 e 8 (Figura 2).

Os locais A e B estão contidos dentro do tabuleiro costeiro do sul da Bahia com solos do Grupo barreiras, apresentando no local A o domínio de Latossolo Amarelo e no local B Argissolo Amarelo. Os Latossolos são solos minerais e profundos que possuem baixa fertilidade e alta permeabilidade à água e tendência ao ressecamento (GAMBA, 2016a; GAMBA, 2016b). Os Argissolos são profundos a medianamente profundos com drenagem moderada e baixos teores de matéria orgânica (GAMBA, 2016b; GAMBA, 2014).

Os solos dessa região podem apresentar horizontes coesos (fragipã e duripã), com distinção de resistência e capacidade de fragmentação. O fragipã se torna menos resistente quando molhado e fragmenta-se em pouco tempo. O duripã possui forte cimentação e não se fragmenta mesmo com o longo período molhado (MOREAU et al., 2006).

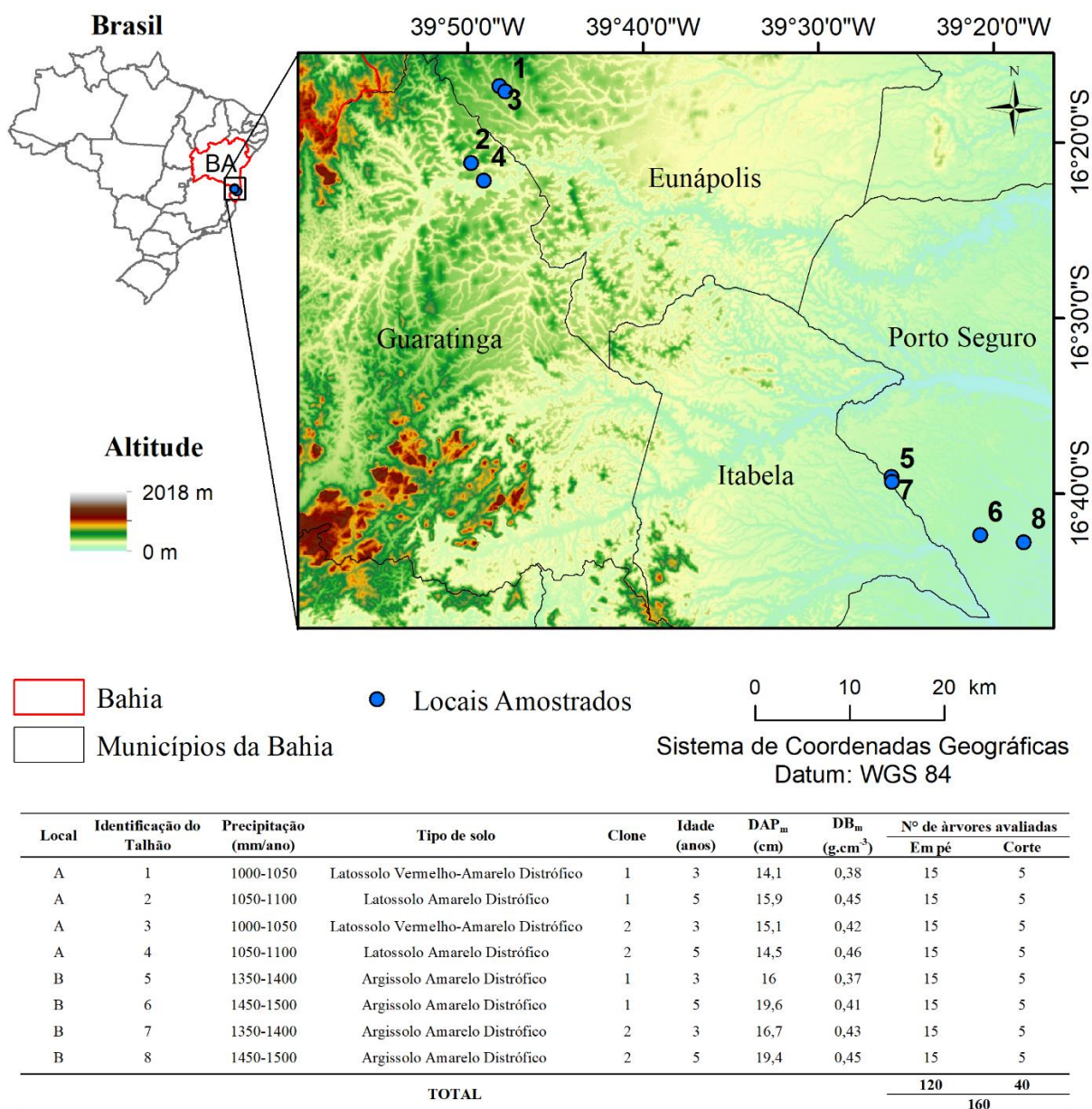


Figura 2 – Mapa dos talhões comerciais e informações de altitude, precipitação e tipo de solo dos locais estudados e de idade, diâmetro médio (DAP_m) e densidade básica média (DB_m) da madeira dos materiais genéticos.

Fonte: O autor (2019).

3.2 Seleção das árvores em campo e amostragem

As árvores foram selecionadas em função do diâmetro a altura do peito - DAP médio ($1,30 \pm 2$ cm do solo) obtido pelo inventário florestal dos locais, e distribuídas aleatoriamente na área dos talhões comerciais. Foram selecionadas 160 árvores, sendo 80 por local, 40 por clone e 20 por idade (tabela da Figura 2).

Nas árvores selecionadas para o estudo, foram realizadas perfurações com o resistógrafo à altura do DAP em duas profundidades (5 cm e raio) [Figura 3 (1)]. Para evitar influências negativas nas mensurações de resistência, realizou-se as perfurações no sentido perpendicular à orientação dos ventos, observada pela inclinação e movimentação da copa das árvores no talhão, para evitar amostrar regiões com lenho de reação; sempre que identificado um nó periférico na região do DAP modificou-se a perfuração para o lado, acima ou abaixo; e não realizou-se perfurações no momento de incidência de ventos no talhão.

Dentro de cada talhão, amostraram-se 20 árvores, destas, 5 árvores foram cortadas e retirou-se um disco de 5 cm na região do DAP [Figura 3 (1)]. Ao todo, 40 árvores foram cortadas [2 sítios x 2 clones x 2 idades x 5 repetições (árvores) = 40 discos] e amostradas para determinação da densidade da madeira [Figura 3 (2)].

3.3 Resistência à perfuração (RP) da haste do resistógrafo

As mensurações de RP das árvores amostradas foram realizadas com o equipamento RESISTOGRAPH® R650-SC (Series 6, RINNTECH, Heidelberg, Alemanha), com velocidade de avanço de 20 mm s⁻¹. Foram realizadas 2 leituras por árvore totalizando 320 leituras [Figura 3 (1)]. Em todas as perfurações realizadas manteve-se o ângulo de 90° em relação ao eixo da árvore, controlado por um nível de bolha sobre o equipamento (RINN, 2012; SILVA, 2019).

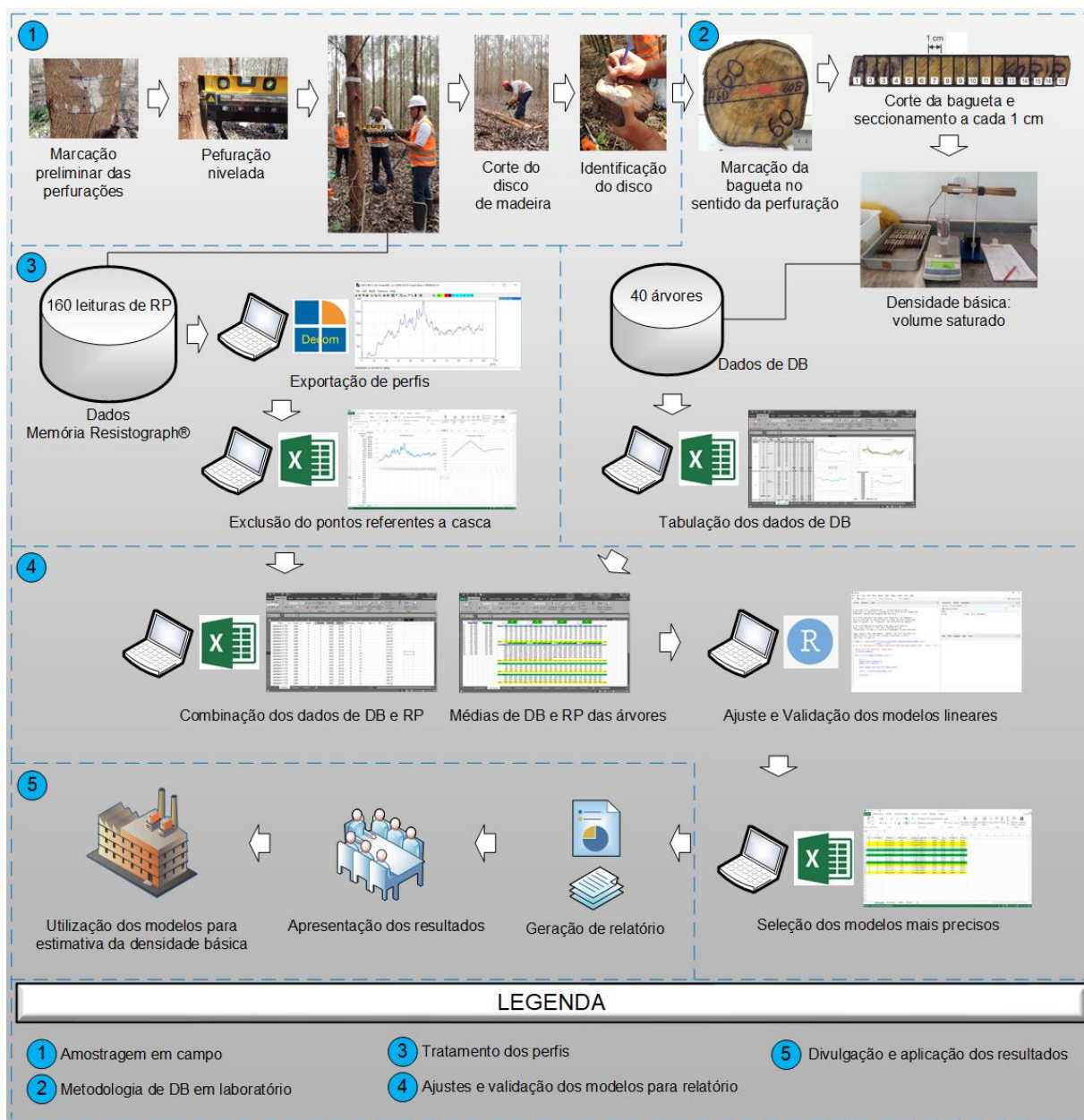


Figura 3 – Fluxograma das etapas de coleta, processamento e análise de dados, geração de resultados e aplicação.

Fonte: O autor (2019).

As leituras de RP coletadas foram exportadas do resistógrafo, e convertidas pelo *software* DECOM® em planilhas no formato .xlsx e analisadas no *software* EXCEL®, onde foram excluídos os dados dos pontos amostrados da região referente a casca [Figura 3 (3) e Figura 4].

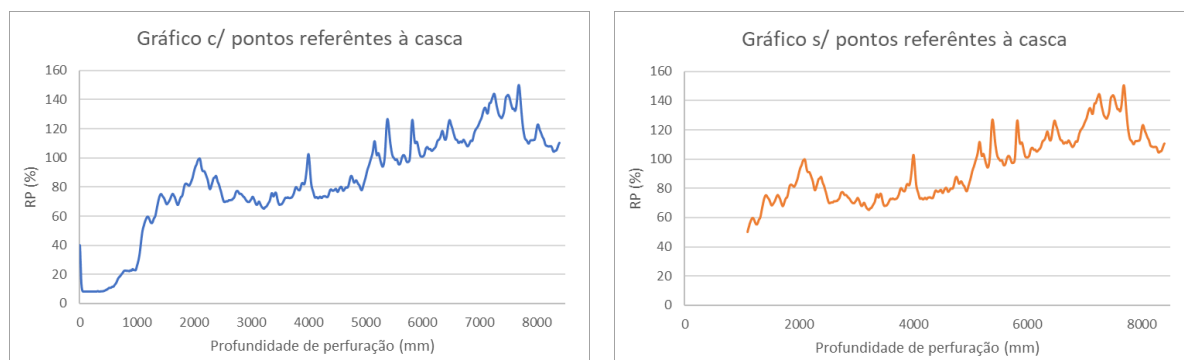


Figura 4 – Exclusão dos pontos de resistência à perfuração correspondentes à casca da árvore pelo software EXCEL®.

Fonte: O autor (2019).

3.4 Densidade básica da madeira

Amostras a cada 1 cm foram retiradas das seções radiais dos 40 discos [Figura 3 (2)] para determinação da densidade básica (DB) da madeira, de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). Por fim, calculou-se a DB média por raio (casca-medula).

3.5 Ajuste e validação dos modelos de regressão

Os registros das leituras de RP foram organizados utilizando o software EXCEL®, onde foram obtidas as médias das leituras por árvore das perfurações do Raio e 5 cm. Estas médias foram dispostas junto das médias de DB por árvore [Figura 3(4)].

Os modelos de regressão foram ajustados por meio do software R [Figura 3 (4)]. Os modelos lineares foram analisados pela significância da análise de regressão (teste F) e de todos os coeficientes da equação (teste t), pelo coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$)(1), erro padrão residual (S_{yx})(2) e raiz quadrada do erro médio (RMSE)(3), formalmente definidos nas equações 1 a 3.

$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{(n-1)}{(n-2)} (1-R^2) \quad (1)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y')^2}{n - p}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - Y')^2}{n}} \quad (3)$$

Em que:

S_{yx} : erro padrão residual;

Y : valor observado;

Y' : valor estimado;

n : número de observações;

p : número de coeficientes do modelo matemático.

Abordaram-se neste estudo as estratégias apresentadas na Tabela 1, as quais isolaram-se os principais fatores a serem avaliados.

Tabela 1 – Referência das estratégias abordadas.

Estratégia	Isolamento	Abrangência	Talhões amostrados
1	Idade 1*	Clones 1 e 2 e Locais A e B	2,4,6,8
2	Idade 2	Clones 1 e 2 e Locais A e B	1,3,5,7
3	Clone 1	Idade 1 e 2 e Locais A e B	3,4,7,8
4	Clone 2	Idades 1 e 2 e Locais A e B	1,2,5,6
5	Local A	Idades 1 e 2 e Clones 1 e 2	1,2,3,4
6	Local B	Idades 1 e 2 e Clones 1 e 2	5,6,7,8
7	-	Idades 1 e 2, Clones 1 e 2 e Locais A e B	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
8	-	Idades 1 e 2, Clones 1 e 2 e Locais A e B	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

* Idade 1: 3 anos, Idade 2: 5 anos.

Fonte: O autor (2019).

Para as medidas de precisão da profundidade de perfuração, utilizou-se os valores de RP de cada posição de perfuração e a DB pontual e média da árvore (Raio casca-medula). Modelos de regressão linear foram ajustados para cada profundidade de perfuração utilizando o *software* SigmaPlot 13.0®, também abrangendo os talhões de acordo com cada estratégia. As profundidades de perfuração mais aptas à estimação da DB foram definidas como aquelas de maior $R^2_{aj.}$ e menor S_{yx} .

Com o intuito de manter uma quantidade maior de dados no ajuste, optou-se pela técnica de validação cruzada *leave one out* (deixar um fora) devido a amostragem de 20 árvores nas estratégias 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. A rotina escrita no *software* R para o método realizou o ajuste dos modelos de regressão utilizando 19 árvores, deixando uma árvore independente fora do ajuste, e se repetiu por 20 vezes. Ao final, o grupo das 20 amostras deixado de fora foi utilizado na validação. A ilustração da realização das 20 etapas é apresentado na Figura 5.

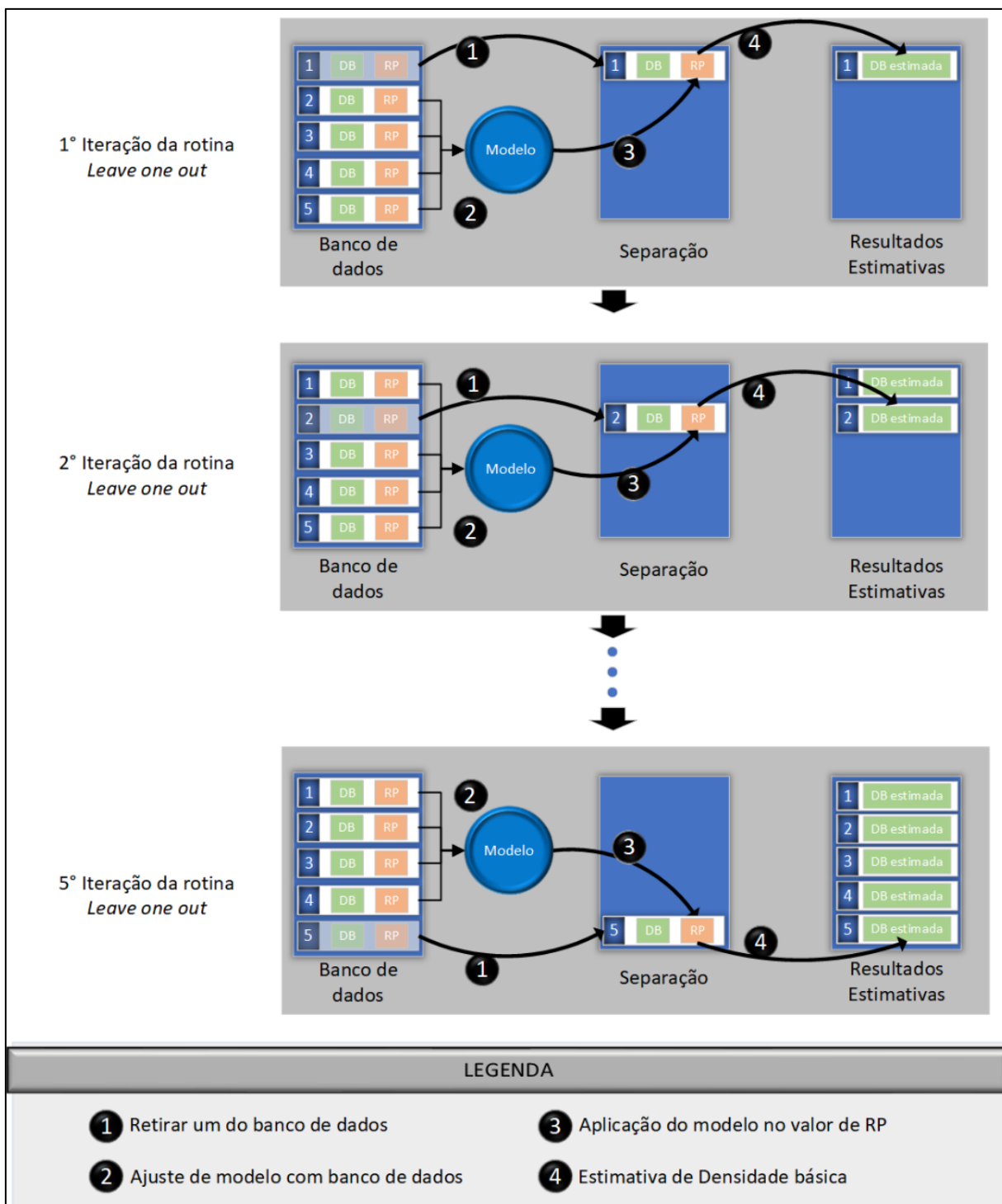


Figura 5 – Metodologia de validação *leave one out*.
 Fonte: O autor (2019).

4. RESULTADOS

As variáveis RP e DB podem ser previamente analisadas a partir de seus valores médios apresentados na Tabela 2. A DB média do clone 2 não variou expressivamente independente da idade ou local, já para o clone 1 observou-se a variação entre idade, mas não entre locais de crescimento. A RP média do clone 2 é variável entre os locais, destacando maiores valores no B e menores no A, o inverso do observado para o clone 1. A RP média aumentou com a idade independentemente do local, com exceção do clone 2 no B, em que a RP foi muito semelhante entre as idades.

Tabela 2 – Valores médios da resistência à perfuração (RP) e densidade básica (DB) radial da madeira dos clones de *E. grandis* x *E. urophylla* por idade e local de crescimento.

Variáveis	Local	Clone 1		Clone 2	
		3 anos	5 anos	3 anos	5 anos
RP (%)	A	89,91 (23,52)	139,67 (27,71)	85,47 (16,77)	119,36 (25,36)
	B	74,40 (15,53)	109,37 (19,94)	127,15 (25,00)	127,50 (17,82)
DB (g.cm ⁻³)	A	0,38 (6,62)	0,45 (6,50)	0,42 (6,23)	0,46 (10,84)
	B	0,37 (8,80)	0,41 (12,52)	0,43 (10,87)	0,45 (10,19)

Valores entre parênteses são os coeficientes de variação.

A RP das árvores dos dois clones foi influenciada pela idade e local, com exceção do clone 2 no local B que não variou para as duas idades. No geral, menores valores de RP foram observados aos 3 anos e maiores aos 5 anos. O local influenciou de maneira inversa os clones, para o clone 1 foram encontrados maiores valores de RP no local A e para o clone 2 maiores valores de RP foram encontrados no local B.

Os gráficos dos coeficientes de determinação (R^2_{aj}) e erro padrão da estimativa (S_{yx}) criados para cada profundidade de perfuração (cm), possibilitam a análise para determinar a melhor posição para estimar a DB da madeira, observando a posição com maior R^2_{aj} e menor S_{yx} , destacada de azul nos gráficos de barra (Figuras 6 e 7).

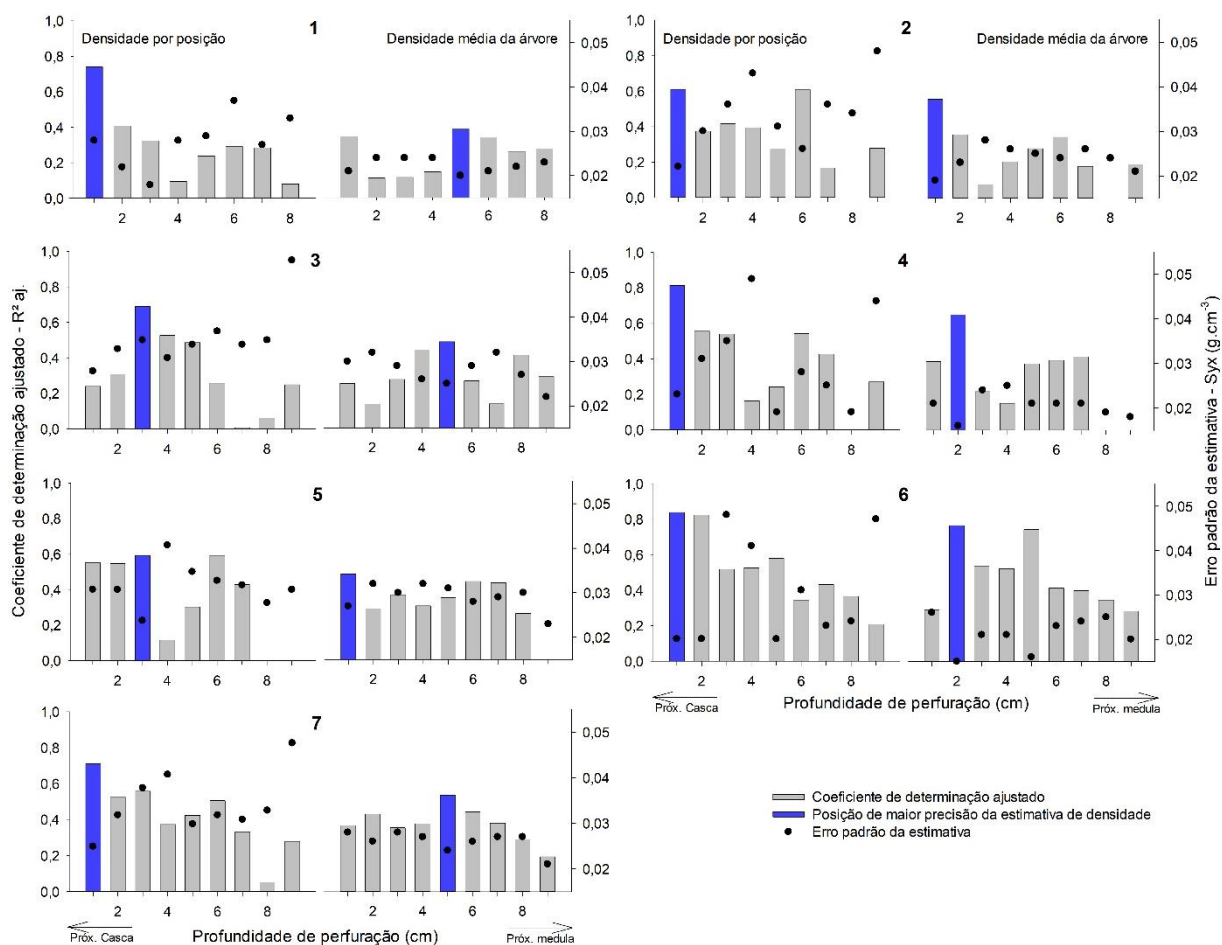


Figura 6 – Medidas de precisão da estimativa da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* por estratégias de análise (1 a 7) da profundidade de perfuração radial - casca a medula.

As melhores profundidades de perfuração da haste do resistógrafo para estimar a DB por posição casca-medula foram observadas até o terceiro centímetro, e ao analisar a estimativa da DB média do raio foram observadas até o quinto centímetro, para as perfurações do raio e 5 cm (Figuras 6 e 7).

As estimativas de DB por posição e média da árvore das estratégias 4 e 6 foram mais eficientes na predição da DB nas perfurações do raio e 5 cm quando comparadas às estratégias 3 e 5, respectivamente (Figuras 6 e 7).

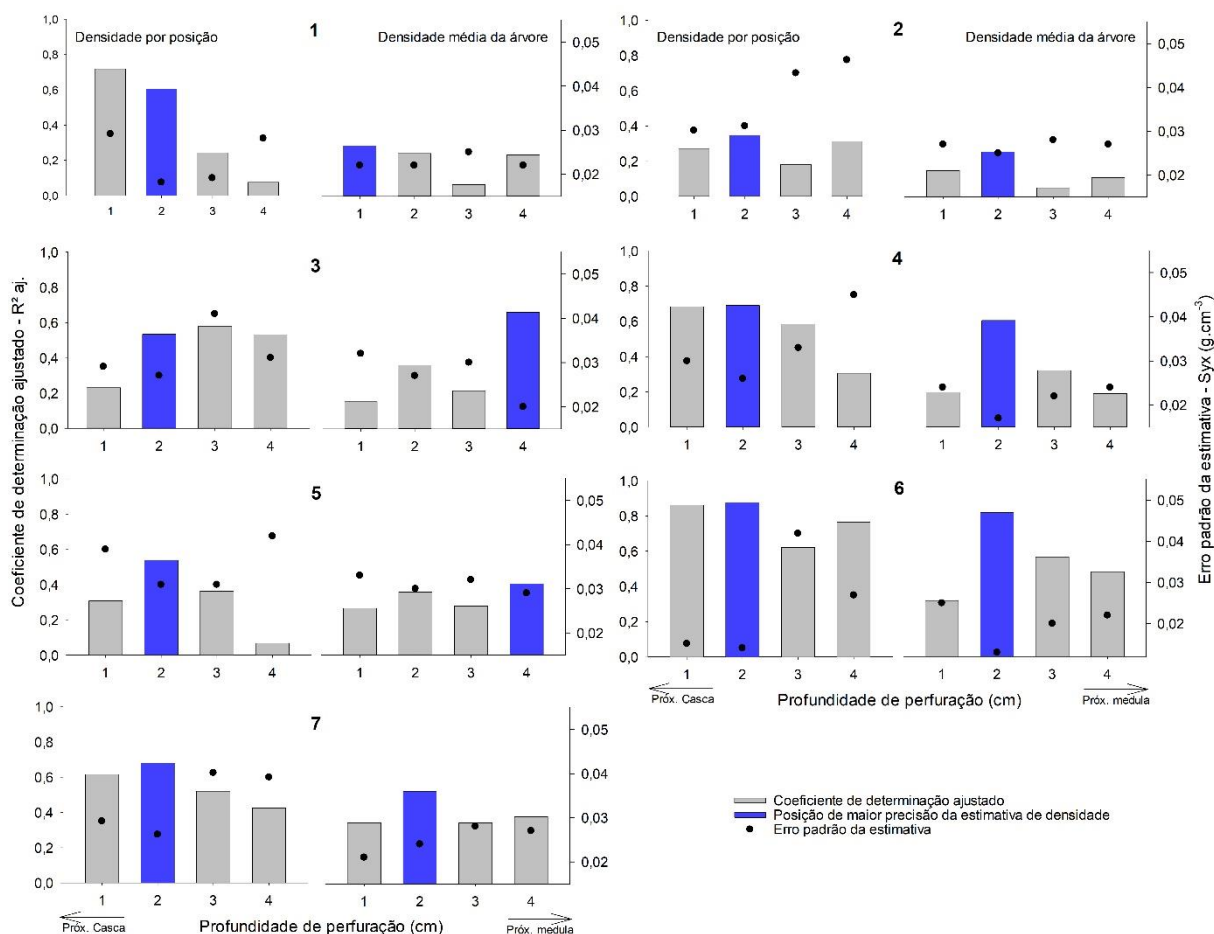


Figura 7 – Medidas de precisão da estimativa da densidade básica da madeira de clones de *E. grandis* x *E. urophylla* por estratégias de análise (1 a 7) da profundidade de perfuração periférica – primeiros 5 cm da casca.

As melhores posições de predição da DB por posição casca-medula e média da árvore para as duas perfurações estudadas ocorreram, em geral, próximas à casca, com exceção das estimativas de DB média das árvores das estratégias 1, 3 e 7 perfurando o raio (Figura 6) e das estratégias 3 e 5 perfurando 5 cm (Figura 7).

Na etapa de ajuste, os modelos apresentaram valores de $R^2_{ajustado}$ no intervalo de 0,25 a 0,83 e erros absolutos (S_{yx}) entre 0,0187 a 0,03 $g \cdot cm^{-3}$, já na validação valores de R^2 de 0,09 a 0,81 e S_{yx} entre 0,0193 a 0,0429 $g \cdot cm^{-3}$ (Tabela 3).

Os dois melhores modelos ajustados são para a estratégia 6 ($R^2_{ajustado} = 0,708$ para o Raio e 0,834 para 5 cm), o que indica que os dados do material amostrado neste local proporcionou estimativas mais precisas. Os modelos mais atrativos para utilização são o 13, 14, 15 e 16, pois eles conseguem gerar resultados referentes a toda a amostragem, com $R^2_{ajustado}$ moderado.

Tabela 3 – Modelos de regressão ajustados e validados de acordo com as estratégias.

Estr.	Perf.	Modelo	Ajuste		Validação	
			R ² Ajustado	S _{yx} (g cm ⁻³)	R ²	S _{yx} (g cm ⁻³)
1	R	1) DB = 0,3368*+0,0007*x RP	0,333	0,0211	0,261	0,0231
	5	2) DB = 0,3285*+0,0009*x RP	0,452	0,0188	0,328	0,0217
2	R	3) DB = 0,2920*+0,0012*x RP	0,591	0,0190	0,529	0,0217
	5	4) DB = 0,3604*+0,0009*x RP	0,250	0,0300	0,087	0,0370
3	R	5) DB = 0,2817*+0,0012*x RP	0,573	0,0223	0,512	0,0246
	5	6) DB = 0,2691*+0,0017*x RP	0,622	0,0237	0,562	0,0264
4	R	7) DB = 0,3435*+0,0008*x RP	0,541	0,0187	0,472	0,0213
	5	8) DB = 0,3369*+0,0010*x RP	0,492	0,0289	0,385	0,0341
5	R	9) DB = 0,3106*+0,0011*x RP	0,580	0,0255	0,532	0,0278
	5	10) DB = 0,3442*+0,0009*x RP	0,337	0,0319	0,193	0,0379
6	R	11) DB = 0,2969*+0,0011*x RP	0,708	0,0166	0,648	0,0193
	5	12) DB = 0,2727*+0,0016*x RP	0,834	0,0182	0,814	0,0204
7	R	13) DB = 0,3011*+0,0011*x RP	0,601	0,0228	0,573	0,0354
	5	14) DB = 0,3107*+0,0012*x RP	0,586	0,0269	0,531	0,0429
8	R	15) DB = 0,317*+0,0004825*x RP +0,0001629*x (Idade x RP1)	0,721	0,0183	0,697	0,0198
	5	16) DB = 0,3215906*+0,0005238726* x RP +0,0001876276*x (Idade x RP1)	0,655	0,0244	0,674	0,0241

Estr.: estratégia, Perf.: perfuração, R: raio, 5: 5 cm, DB: densidade básica média, RP: resistência à perfuração média, R²: coeficiente de determinação (DBxDB est.), S_{yx}: erro padrão residual, RP1: valor de resistência à perfuração do primeiro centímetro, *Significância do teste t (p<0,05).

Os gráficos de dispersão são apresentados na Figura 8 com os modelos de regressão ajustados, bem como os de ajuste e validação entre os dados de densidade real (amostragem destrutiva) e estimada pelos modelos. O modelo 4 possui o menor R²_{ajustado}, já o modelo 12 possui o maior R²_{ajustado} e o terceiro (modelo 13) possui R²_{ajustado} moderado, porém ele pode ser aplicado em qualquer situação abordada neste estudo.

Os pontos do gráfico do modelo 4 (Figura 8) estão dispersos da linha de regressão, assim como da linha que representa R² = 1,00 entre os dados de DB observada x DB estimada nos gráficos do Ajuste e Validação, justificando o R²_{ajustado}= 0,25 do Ajuste e R²= 0,087 da Validação.

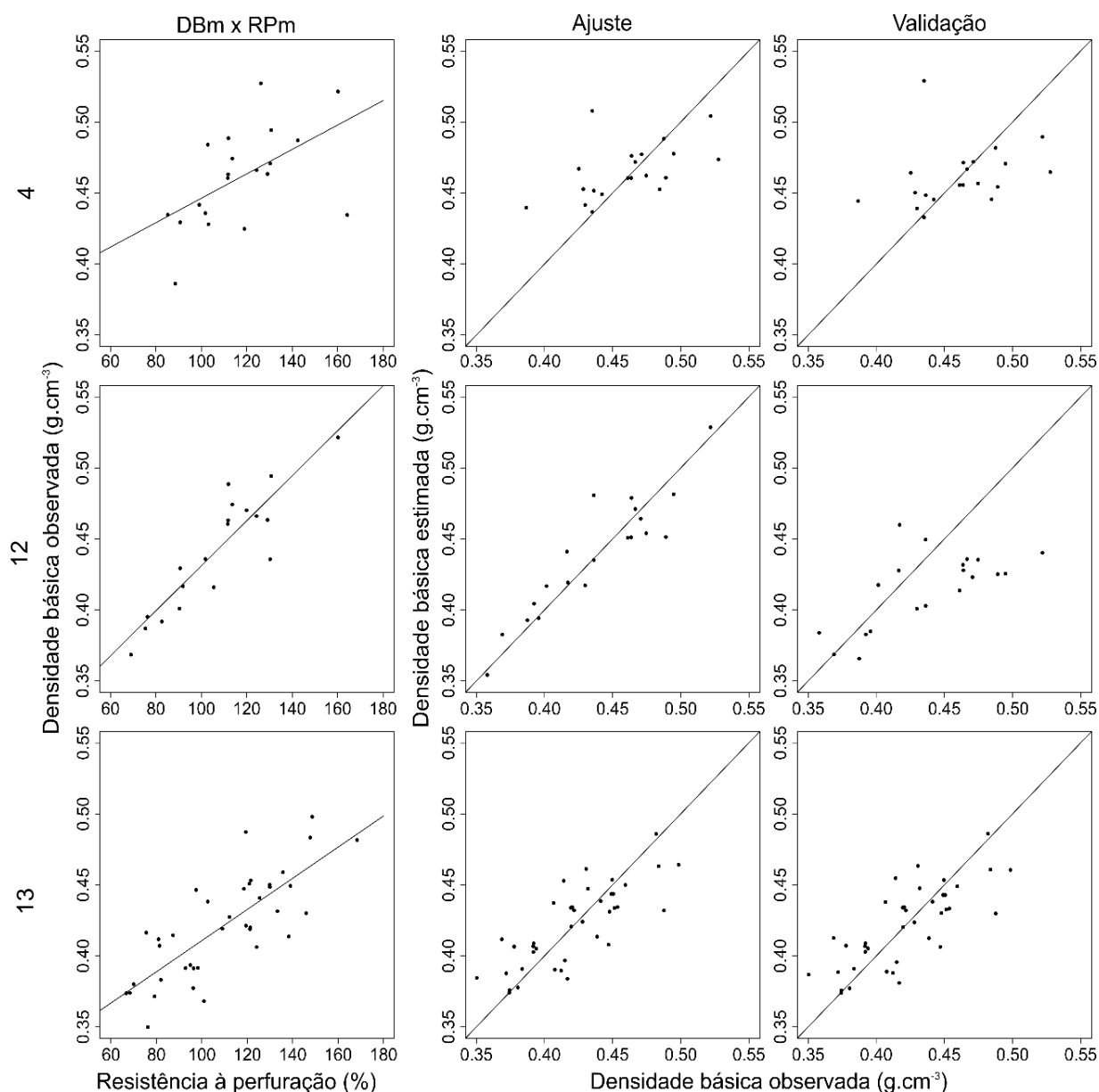


Figura 8 – Gráficos de dispersão da regressão, ajuste do modelo e validação dos principais modelos.

Os pontos no gráfico do modelo 12 tendem a seguir a linha da regressão, bem como a linha que representa $R^2 = 1,00$ do Ajuste, devido ao $R^2_{ajustado} = 0,83$. Porém, o gráfico da Validação indica que tal modelo possui a tendência à subestimação dos valores de densidade básica a partir de $0,45 \text{ g cm}^{-3}$, mesmo que este possua $R^2 = 0,81$.

Os pontos dos gráficos de ajuste e validação do modelo 13 (Figura 8), apresentam-se melhores distribuídos quando comparados ao modelo 4 e 12 o que corrobora com os resultados da tabela 3 ($R^2_{ajustado} = 0,60$, e $R^2 = 0,57$ da validação).

Após o processamento e análise dos resultados apresentados até sétima estratégia, identificou-se que é mais preciso estimar a DB da madeira utilizando

modelos genéricos e perfurando o raio, com abrangência de todas as variáveis em estudo. A partir disto, buscou-se o aprimoramento do modelo genérico (estratégia 7), o que resultou na estratégia 8 com os modelos 15 e 16 (duas últimas linhas da Tabela 3). Nestes modelos foram adicionados o produto da idade com a RP mensurada no primeiro centímetro a partir da casca, devido aos resultados de precisão destes pontos (Figura 6). A comprovação da precisão entre os modelos genéricos 13 e 15 é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Densidade básica estimada pela resistência à perfuração parcial (raio casca-medula) na amostragem destrutiva (40 árvores) e não destrutiva (120 árvores em pé).

Talhão	40 árvores com amostras de DB								120 árvores sem amostras de DB		
	Dados obs.		Est. mod.						Dados obs.	Est. mod.	
			13			15				13	15
DB	RP	R ²	RMSE (%)	DB est.	R ²	RMSE (%)	DB est.	RP	DB est.	DB est.	
1	0,378	89,82	0,00	6,56	0,400	0,08	4,57	0,393	82,02	0,391	0,385
2	0,449	118,88	0,08	6,33	0,432	0,00	5,09	0,437	124,77	0,438	0,439
3	0,416	85,69	0,61	5,29	0,395	0,68	5,64	0,393	88,64	0,399	0,394
4	0,461	139,67	0,72	3,88	0,455	0,84	2,75	0,460	150,24	0,466	0,461
5	0,374	74,40	0,00	4,11	0,383	0,19	4,09	0,385	68,08	0,376	0,376
6	0,413	109,37	0,58	2,90	0,421	0,60	4,78	0,431	106,01	0,418	0,429
7	0,427	127,15	0,03	5,34	0,441	0,78	1,72	0,424	121,80	0,435	0,414
8	0,448	127,50	0,56	2,57	0,441	0,93	1,89	0,446	135,23	0,450	0,447
Total Geral	0,4221	109,74	0,62	5,00	0,4216	0,74	4,17	0,4218	109,64	0,4217	0,4182

Dados obs.: Dados observados, Est. mod.: Estimativas dos modelos, DB: Densidade básica média, RP: Resistência à perfuração média, DB est.: Densidade básica média estimada, RMSE: Raiz quadrada do erro médio, R²: Coeficiente de determinação (DBxDB est.).

Os dados das medidas de precisão e estimativa de DB utilizando o modelo 14 e 16 para as perfurações periféricas são apresentadas na Tabela 5. A qual observa-se um maior RMSE, quando comparado aos modelos da perfuração radial.

Tabela 5 – Densidade básica estimada pela resistência à perfuração periférica (primeiros 5 cm da casca) na amostragem destrutiva (40 árvores) e não destrutiva (120 árvores em pé).

Talhão	40 árvores com amostras de DB								120 árvores sem amostras de DB		
	Dados obs.		Est. mod.						Dados obs.	Est. mod.	
	DB	RP	14			16			RP	14	16
			R ²	RMSE (%)	DB est.	R ²	RMSE (%)	DB est.		DB est.	DB est.
1	0,389	81,98	0,08	6,49	0,409	0,09	4,92	0,403	81,14	0,408	0,401
2	0,443	101,77	0,02	5,91	0,433	0,02	5,95	0,446	110,33	0,443	0,454
3	0,416	74,68	0,13	4,14	0,400	0,15	4,57	0,398	92,11	0,421	0,411
4	0,462	130,29	0,15	9,10	0,467	0,27	8,46	0,473	129,84	0,466	0,477
5	0,380	70,83	0,84	4,26	0,396	0,55	4,06	0,393	67,26	0,391	0,391
6	0,456	105,48	0,71	4,93	0,437	0,66	3,53	0,448	113,26	0,446	0,454
7	0,428	107,53	0,54	4,38	0,440	0,96	1,16	0,430	108,04	0,440	0,422
8	0,484	131,53	0,72	3,91	0,469	0,65	3,94	0,470	124,91	0,461	0,463
Total Geral	0,4334	100,98	0,60	6,05	0,432	0,67	5,43	0,433	103,18	0,435	0,434

Dados obs.: Dados observados, Est. mod.: Estimativas dos modelos, DB: Densidade básica média, RP: Resistência à perfuração média, DB est.: Densidade básica média estimada, RMSE: Raiz quadrada do erro médio, R²: Coeficiente de determinação (DBxDB est.).

Dentre os modelos genéricos apresentados o 15 é mais preciso com menor erro na estimativa de DB da madeira. A DB estimada gerada por este acompanha melhor a variação da DB real, comparada aos outros dois modelos, e o maior erro absoluto encontrado por este modelo está abaixo de 10 % (Figura 9).

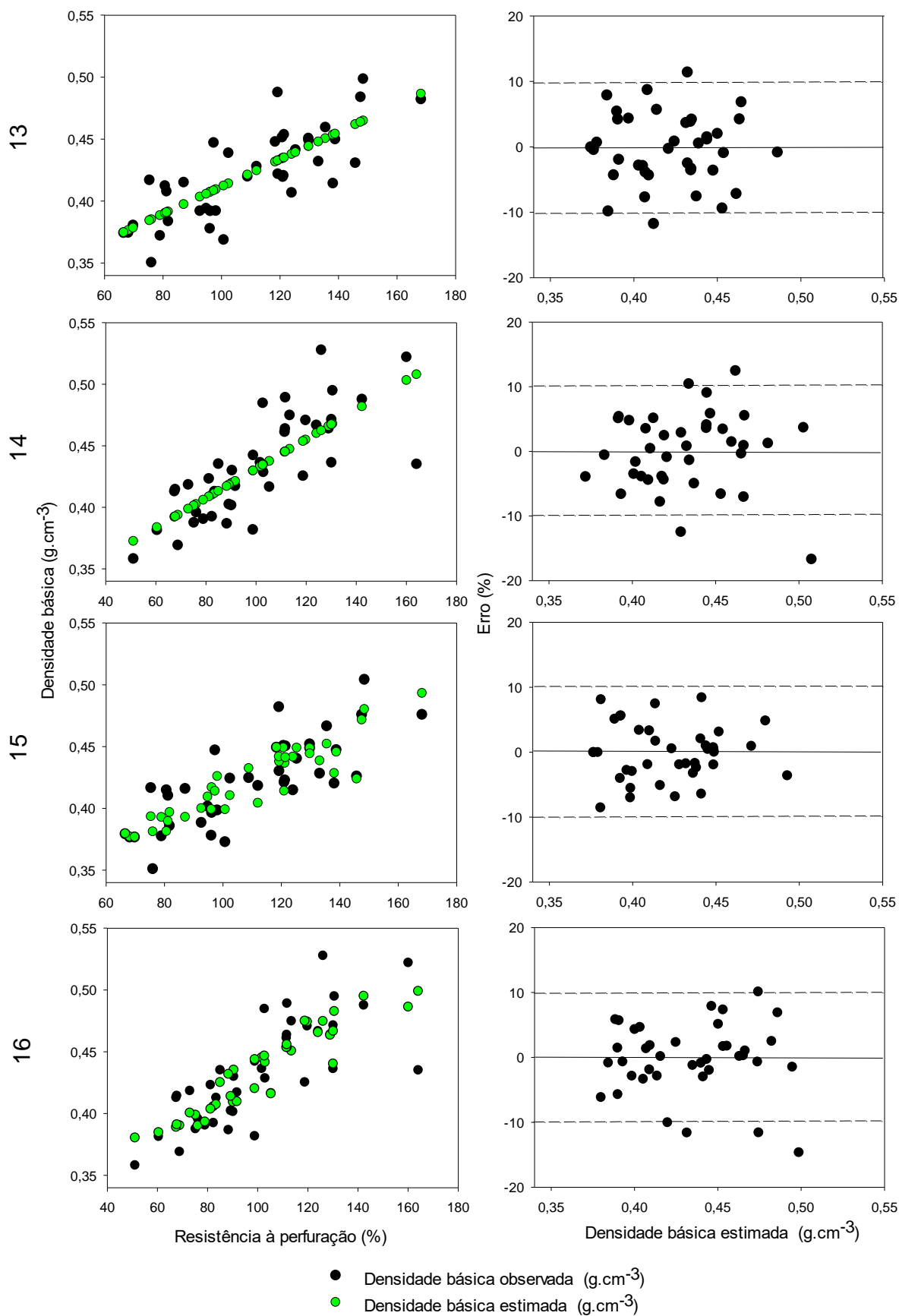


Figura 9 – Gráficos de dispersão da densidade básica observada e estimada por resistência à perfuração e distribuição gráfica dos resíduos dos modelos 13, 14, 15 e 16.

5. DISCUSSÃO

A DB médias das árvores foi mais influenciada pela idade do que pelo local de crescimento, pois há um incremento na densidade com passar de 3 para 5 anos. Este incremento é natural e normal com o avançar da idade, e está descrito nos estudos Santana et al. (2012), Castro (2013) e Carneiro et al. (2014) ao avaliarem espécies de *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. urophylla* dos 3 aos 7 anos.

A menor influência dos locais na DB pode estar atrelado ao fato que a densidade é uma característica genética herdável pela espécie (DAVIES; APIOLAZA; SHARMA, 2017; LIMA et al., 2019). Sendo ainda previsto que os clones foram criados a partir de programas de melhoramento que visam a estabilidade e adaptabilidade dos mesmos em diferentes condições ambientais (NUNES et al., 2016), a não influencia do local pode ocorrer em resposta ao processo de seleção dos clones antes deles serem inseridos em cada ambiente.

As diferenças ambientais dos locais (precipitação e solos) não influenciaram na DB da madeira. Porém, a partir das leituras de RP em que se ajustaram os modelos é observado a melhor predição dos pontos de perfuração do local B comparado ao A. O efeito pode ser explicado pela possível maior umidade dos materiais no local B, com a maior disponibilidade de água.

Apesar da umidade ter efeito negativo, ao reduzir o escoamento dos cavados (KLOPPENBURG, 2018; SILVA, 2019), essa pode atuar como lubrificante durante o corte (SHARAPOV et al., 2018 b) em madeiras com maior umidade ao realizar perfuração parciais (5 cm e raio) (SILVA, 2019), pois o benefício da lubrificação será maior do que o aglutinamento dos cavacos.

Os melhores pontos para a estimativa da DB foram encontrados nos primeiros três centímetros de perfuração assim como relatado por Oliveira, Wang, Vidaurre, (2017), Jesus (2019) e Silva (2019). Estes autores descreveram que as melhores correlações ocorrem nesta região devido a menor influência do atrito da haste do resistógrafo com o lenho nas primeiras leituras de RP.

O potencial da utilização do resistógrafo para estimação da densidade é demonstrada pelo modelo de regressão ajustado na estratégia Total Raio, pois este pode ser aplicado a qualquer uma das estratégias e permite a estimação de dados com as variações de idade, clone e local de crescimento, todas juntas. A observação

de melhores correlações em bases de dados mais variadas é relatada por Lima et al. (2007), Gouvêa et al. (2011) e Oliveira, Wang e Vidaurre (2017).

Pela precisão e erro dos modelos ajustados, foi possível determinar o raio (casca-medula) como a melhor estratégia de perfuração para à estimação da DB da madeira de árvores jovens de *E. grandis* x *E. urophylla*. Pois nas perfurações do raio foram ajustados modelos com melhores correlações entre DB observada e DB estimada e menores erros absolutos [Tabela 3 e Figuras 6 e 7].

O resistógrafo foi efetivo para estimar a DB da madeira de eucalipto, quando considerada na modelagem todas as variáveis em estudo combinadas (idade, clone e local de crescimento). Ao ajustar modelos específicos de estimativa da DB pela RP da haste do resistógrafo para a idade, clone e local, ou até mesmo em um talhão específico (ex: local B_3 anos _clone 1_Raio), as mensurações podem não representar exatamente as variações da DB da madeira. Sendo aconselhável ajustar e utilizar modelos genéricos para estimativa da DB, e somado a isso, acrescentar uma ou mais variáveis nos modelos que melhorem a precisão e reduzam o erro.

As DB estimadas pelos modelos 15 e 16 (Figura 9), possuem menor erro por se aproximarem dos valores de DB observada, característica conferida ao modelo devido à combinação das variáveis idade e RP do primeiro centímetro. A utilização destas variáveis é justificada, pois foi observado que a densidade aumentou da idade de 3 para 5 anos para os dois clones e nos dois locais avaliados, e a RP do primeiro centímetro de perfuração possuiu as melhores correlações com a DB dessa posição.

6. CONCLUSÃO

O ajuste e a estimativa da densidade da madeira por modelos lineares genéricos foram mais efetivos que os modelos específicos para cada idade, clone ou local.

A utilização da perfuração do raio (casca-medula) se mostrou mais eficiente para estimar a densidade básica, por ter ajustado modelos lineares simples facilmente. Sendo necessário mais estudos para a aplicabilidade da perfuração de 5 cm, pois esta é realizada em menor tempo e é possível ajustar modelos mais complexos para a sua futura utilização.

Para a empresa recomenda-se a utilização do modelo $\text{Total} + \text{idade} \cdot \text{RP}$, pois este é capaz de gerar estimativas precisas de DB da madeira de clones jovens de eucalipto com baixo erro absoluto, quando aplicado a qualquer uma das variáveis (idade, clone e local) isoladas ou em conjunto.

7. CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizar amostragem a cada 0,5 cm para estudos de comportamento de DB e RP da haste do resistógrafo ao longo do raio ou diâmetro, pois a amostragem a cada 1 cm não permite uma abordagem criteriosa de variabilidade.

Para o desenvolvimento de novos modelos para outros materiais, se necessários, com o interesse somente na estimativa da DB média da árvore (aplicação prática em empresas) sem avaliar o comportamento de DB e RP, utilizar a densidade do raio inteiro ou diâmetro inteiro, e considerar também a amostragem por cunha ou disco na determinação de DB. Esta técnica permitirá rapidez na determinação da DB em laboratório.

E no desenvolvimento dos novos modelos, utilizar uma maior amostragem de DB da madeira, de 80 a 200 árvores, para compor um banco de dados que possibilite ajustar modelos com ainda mais variáveis. Para esta finalidade a DB da madeira deve ser amostrada pelo raio ou disco.

Desenvolver técnicas para tratar as leituras de RP, que excluam os pontos referentes a casca e monte os bancos de dados de todas as perfurações realizadas e armazenadas na memória do equipamento.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11941**: madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BOBADILHA, G. S. et al. Efecto del ataque de *Leptocybe invasa* en plantaciones de eucalipto destinadas a la producción de pulpa de celulosa Kraft. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 20, n. 2, p. 171-182, 2018.

BOUFFIER, L. et al. Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? **Annals of Forest Science**, v. 65, n. 1, p.106.1-106.8, 2008.

BRICK TIE PRESERVATION. **Micro-drilling structural timbers**. 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=KehZEVjVWhc/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

BRITO, A. S. **Efeito do espaçamento de plantio nas propriedades da madeira em árvores jovens de eucalipto**. 2017. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.

CARDIN, V. S. **Ensaio não destrutivo aplicado à madeira serrada e estruturas**: técnicas potenciais para uso no Brasil. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

CALLISTER, A. N.; ENGLAND N. F. How dense is my blue gum? Prediction of whole-tree basic density of *Eucalyptus globulus*. **New Forests**, v 40, p.153–164. 2010.

CÂMARA, A. P. et al. Physiological disorders affecting dendrometric parameters and *Eucalyptus wood* quality for pulping wood. **Cerne**, v. 24, n.1, p.27-34, 2018.

CARNEIRO, A. C. O. et al. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381, 2014.

CARNEIRO, M. F. **Qualidade da madeira de clones de eucalipto utilizados na produção de celulose**. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2017.

CASTRO, A. F. N. M. et al. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.48, n.6, p.627-635, 2013.

CERALDI, C.; MORMONE, V.; RUSSO ERMOLLI, E. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. **Materials and Structures**, v. 34, n. 1, p. 59-64, 2001.

CHAUHAN, S. Wood Quality: in context. In: WALKER, J. C. F. **Primary wood processing: principles and practice**. Springer, 2006, p. 121-158.

DAVIES, N. T.; APIOLAZA, L. A.; SHARMA, M. Heritability of growth strain in *Eucalyptus bosistoana*: a Bayesian approach with left censored data. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 47, n. 5, 2017.

DIAS, D. C. et al. Uso da técnica de resistografia e de variáveis dendrométricas na modelagem da densidade básica de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 609-619, 2017.

DINWOODIE, J. M. **Timber: Its nature and behavior**. 2ª ed. Taylor & Francis, 2004. 257 p.

DOBNER, M.; HUSS, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 52, n. 2, p. 465-485, 2018.

DOWNES, G. M. et al. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts. **Australian Forestry**, v. 81, n. 3, p. 177-185, 2018.

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation eucalyptus for wood and fiber properties**. CSIRO, Australia. 1997. 132 pp.

FUNDOVA, I.; FUNDA, T.; WU, H. X. Non-destructive wood density assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) using Resistograph and Pilodyn. **PLoS ONE**, v. 13, n. 9, e0204518, 2018.

GANTZ, C. H. **Evaluating the efficiency of the Resistograph® to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species**. 2002. 88 f. Dissertation (Masters in Forest Science) - University of North Carolina State, Raleigh, 2002.

GOUVÊA A. F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

IML INSTRUMENTA MECHANIK LABOR SYSTEM GMBH. **IML-RESI PowerDrill**. 2019. Disponível em: <<https://www.Impl-service.com/product/impl-powerdrill/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

ISIK, F.; LI, B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. **Canadian Journal Forest Research**, v. 33, n. 12, p. 2426-2435, 2003.

KLOPPENBURG, A. M. **Density determination of tropical hardwoods with the Resistograph**. 84 f. 2018. Thesis (Master of Science in Materials Science and Engineering) - Delft University of Technology, Delft, 2018.

LAZZAROTTO, M. et al. Espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica de madeiras de Pinus. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 3, p.119-126, 2016.

LIMA, M. B. et al. Quantitative genetic parameters for growth and wood properties in *Eucalyptus* “urograndis” hybrid using near-infrared phenotyping and genome-wide SNP-based relationships. **PLoS ONE**, v. 14, n. 6, 2019.

LIMA, J. T. et al. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, n. 75, p. 85-93, 2007.

LOPES, C. S. D. et al. Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

MOREAU, A. M. S. S. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do B da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.1021-1030, 2006.

NUNES, A. C. P.; SANTOS, G. A.; RESENDE, M. D. V. de; SILVA, L. D.; HIGA, A. R.; ASSIS, T. F. Estabelecimento de zonas de melhoramento para clones de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Scientia. Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 563-574, 2016.

NUTTO, L.; BIECHELE, T. Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction – using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 19., 2015, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. p. 154-161.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA, J. T. S. Propriedades físicas e mecânicas da madeira. In: OLIVEIRA J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Aquarius, 2007, p. 302p.

OLIVEIRA, J. T. S.; WANG, X.; VIDAURRE, G. B. Assessing specific gravity of young *eucalypt* plantation trees using a resistance drilling technique. **Holzforschung**, v. 71, n. 2, p. 137-145, 2017.

ORTEGA RODRIGUEZ, D. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Clues to wood quality and production from analyzing ring width and density variabilities of fertilized *Pinus taeda* trees. **New Forests**, 2019.

GRUPO AMBIENTALISTA DA BAHIA – GAMBA. **Plano municipal de conservação e recuperação da mata atlântica de Eunápolis**. Bahia, 2016b.

GRUPO AMBIENTALISTA DA BAHIA – GAMBA. **Plano municipal de conservação e recuperação da mata atlântica de Guaratinga**. Bahia, 2016a.

GRUPO AMBIENTALISTA DA BAHIA – GAMBA. **Plano municipal de conservação e recuperação da mata atlântica de Porto Seguro**. Bahia, 2014.

PÁDUA, F. A. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 99 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

RINN, F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. **Holztechnologie**, v. 53, n. 3, p. 24-28, 2012.

RINN, F.; SCHWEINGRUBER, F. H.; SCHAR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. **Holzforschung**, v. 50, n. 4, p. 303-311, 1996.

RINNTECH. **Pictures of all ‘real’ RESISTOGRAPH® devices**. 2019. Disponível em: <<http://www.resistograph.com/das-original-the-original/>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

ROCHA, M. F. V. **Influence of plant spacing and genetic material on wood density and stiffness in *Eucalyptus* stands**. 2017. 97 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

ROCHA, S. M. G. **Densidade básica da madeira de eucalipto em gradientes climáticos no Brasil**. 2018. 48 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

RODRIGUES, E. A. C. et al. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, v. 14, n. 2, p. 147-152, 2008.

SANTANA, W. M. S. et al. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal *Eucalyptus*. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2012.

SILVA, J. G. M. **Aplicação da resistografia na estimativa da densidade e umidade da madeira em árvores jovens de eucalipto**. 2019. 104 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.

SHARAPOV, E. et al. Combined effect of wood moisture content, drill bit rotational speed and feed rate on drilling resistance measurements in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). **Wood Material Science & Engineering**, 2018a.

SHARAPOV, E. et al. Wear behavior of drill bits in wood drilling resistance measurements. **Wood and Fiber Science**, v. 50, n. 2, p. 154-166, 2018b.

SHARAPOV, E.; WANG, X.; SMIRNOVA, E. Drill bit friction and its effect on resistance drilling measurements in logs. In: INTERNATIONAL NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF WOOD SYMPOSIUM, 20., 2017, Madison. **Proceedings...** Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2017. p. 413-423.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest Products and Wood Science: An Introduction**. 6^a ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2011. 483 p.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of *Eucalypt* Wood. **Maderas: Ciência y Tecnología**, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

WALKER, J. C. F. **Primary wood processing: principles and practice**. Springer, 2006, p. 121-158.