

Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos

Wood density profile of pine trees using radiographic methods

Paula Gabriella Surdi¹, Geraldo Bortoletto Júnior²,
Vinicius Resende de Castro³, Natalie Ferreira de Almeida⁴,
Rafael Farinassi Mendes⁵, Gilles Chaix⁶ e Mario Tomazello Filho⁷

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo a comparação dos resultados da análise do perfil de densidade aparente do lenho de árvores de pinus, utilizando as metodologias de densitometria de raios X por leitura direta, usualmente aplicada nos laboratórios, e por imagens digitais de raios X, que dispensam o filme radiográfico. No presente estudo foram utilizadas amostras radiais do lenho de cinco árvores de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com 7 anos e 10 meses. Os perfis radiais de densidade aparente do lenho obtidos pela aplicação dos dois métodos radiográficos foram similares. No entanto, a metodologia de imagens digitais de raios X propicia vantagens e resultados qualitativos adicionais bem como maior agilidade no processamento de análise do lenho, sendo, portanto, recomendada nos trabalhos que demandem a avaliação da densidade de significativo número de amostras do lenho de árvores de coníferas e de folhosas.

Palavras-chave: densitometria de raios X; imagem digital de raios X; qualidade do lenho; propriedades físicas.

Abstract

This study aimed to compare the results of the analysis of the wood density profile of pine trees using the methodologies of X-ray densitometry for direct reading, usually applied in laboratories, and digital X-ray images, which dispenses the radiographic film. In the present study the radial wood samples of 5 *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* trees 7 years-10 months were used. The radial wood density profiles obtained by applying the two radiographic methods were similar. However, the methodology of digital X-rays provides additional benefits and qualitative results, greater agility in processing the wood analysis, and is therefore recommended in research that requires the evaluation of the density of a significant number of wood samples of coniferous and hardwoods trees.

Keywords: X-ray densitometry; digital image X-ray; wood quality; physical properties.

INTRODUÇÃO

A densidade é considerada uma das mais importantes propriedades do lenho, relacionando-se, normalmente, com as suas características anatômicas (espessura da parede celular, largu-

ra e diâmetro do lume das fibras ou traqueídes, diâmetro e frequência dos vasos e porcentagem de parênquima), químicas (teor de extrativos, etc.) e propriedades mecânicas, sendo utilizada como índice de qualidade da madeira. Inúmeras variáveis influenciam na densidade do lenho

¹Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais. ESALQ-USP - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo. Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: paulasurdi@usp.br.

²Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais. ESALQ-USP - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo. Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: gbjunior@usp.br.

³Doutor em Recursos Florestais. ESALQ-USP - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo. Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: vresende@gmail.com

⁴Mestre em Recursos Florestais. ESALQ-USP - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo. Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: natalie_amd@yahoo.com.br.

⁵Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira. UFPA - Universidade Federal de Lavras. Campus Universitário, Caixa postal 3037, 37200-000 - Lavras, MG. E-mail: rafaelfarinassi@gmail.com.

⁶Professor Visitante do CIRAD/França no Departamento de Ciências Florestais. ESALQ-USP - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo. Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: gilles.chaix@cirad.fr.

⁷Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais. ESALQ-USP - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo. Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900 - Piracicaba, SP. E-mail: mtomazello@usp.br.

das árvores, como a sua idade, taxa de crescimento, espaçamento e práticas silviculturais (VIANA, 2008).

A densidade aparente da madeira é expressa pela razão da massa e volume da madeira, na condição de 12 % de umidade, de acordo com a ABNT (1997). Os métodos convencionais de determinação da densidade aparente são aplicados para corpos de prova de madeira obtidos, de modo geral, por métodos destrutivos, não permitindo avaliações intra-inter anéis de crescimento em intervalos micrométricos. Neste aspecto, os métodos radiográficos de atenuação de raios X para a determinação da densidade aparente do lenho apresentam vantagens como metodologia não destrutiva, propiciando a otimização do tempo, melhor precisão das análises e com maior eficiência no processamento dos dados (CASTRO, 2011).

A técnica da densitometria de raios X em madeiras para a determinação da sua densidade aparente foi implantada no Brasil por Amaral (1994), sendo importante ferramenta na avaliação da qualidade do lenho das árvores submetidas aos tratamentos silviculturais e variações climáticas, bem como para a caracterização tecnológica da madeira. A técnica possibilita, da mesma forma, a determinação da produção anual da biomassa do lenho e a sua relação com a estrutura anatômica; a aplicação na genética e melhoramento florestal e na avaliação do efeito da fertilização, irrigação, desrama, ataque de fungos e insetos, etc (HUGHES; SARDINHA, 1975; MOTHE et al., 1998; POLGE, 1965; TOMAZELLO FILHO et al., 2005; ARIZAPANA-ALMOCINAD, 2013).

A densitometria de raios X em madeiras utilizou, até o início da década de 1990, o equipamento densitômetro que analisa os filmes radiográficos do lenho das árvores e, pela comparação com uma cunha de calibração (acetato de celulose) de densidade conhecida, propicia a obtenção dos perfis radiais, além dos valores de densidade aparente média, máxima e mínima. Da mesma forma, equipamentos que utilizam a incidência de raios X colimados propiciando a atenuação parcial da radiação das amostras do lenho de árvores de coníferas e de folhosas têm sido utilizados, por inúmeros laboratórios, com as vantagens de dispensar o filme radiográfico, prover a autocalibração e com o processamento automático dos dados pontuais (a cada 40 um) de densidade aparente do lenho (LIN et al., 2007; FERREIRA; TOMAZELLO FILHO, 2009; ARIZAPANA-ALMOCINAD, 2013).

Mais recentemente, com o desenvolvimento dos equipamentos de imagens digitais de raios X direcionados para a ortopedia, odontologia, zootecnia, zoologia, entre outras áreas (WOO; NORDAL, 2006), abriu-se a possibilidade para sua aplicação na análise da qualidade da madeira e de seus produtos. A literatura relata a utilização de imagens radiográficas digitais em tons de cinza da madeira para a determinação da sua densidade pela metodologia de atenuação de nêutrons, além da caracterização dos defeitos do tronco resultantes do crescimento das árvores e do ataque de organismos xilófagos (WU; PENG, 2007; VAN DEN BULCKE et al., 2009; TRTIK et al., 2007). É utilizado, ainda, para detectar as variações dos valores de densidade dos anéis de crescimento e sua correlação com as condições climáticas, ciclo do carbono, influência da fertilização, etc. (BASCINETTO et al., 2004; HUGHES, 2002; MANNES et al. 2007; KEUNECKE et al., 2012; CHERUBINI et al., 2013).

Pelo exposto, o presente trabalho teve como objetivo a comparação dos resultados da análise do perfil de densidade aparente do lenho de árvores de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, utilizando as metodologias de densitometria de raios X por leitura direta, usualmente aplicada nos laboratórios, e por imagens digitais de raios X, que dispensam o filme radiográfico.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área, seleção e corte do lenho das árvores

As cinco árvores de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* com 7 anos e 10 meses, com DAP de 30 cm, foram selecionadas das plantações florestais da Fazenda Pedra Maria, na região de Buri, SP (coordenadas de 48° 26' 13,8"W; 23° 52' 07,5"S; altitude de 660 m), da empresa Pinus Brasil Agro Florestal Ltda. Da base do tronco das árvores foram cortadas seções transversais do lenho e secas em condições normais de laboratório para a posterior determinação da densidade aparente.

Obtenção dos perfis radiais de densidade aparente do lenho

Na seção transversal dos discos do lenho foram demarcadas e cortadas 2 amostras radiais (20x10 mm, largura x espessura), coladas em suportes de madeira, seccionadas em equipamento de dupla serra circular paralela (amostras de

2,0 mm de espessura), acondicionadas (câmara de climatização, 20°C, 24h, 60% UR, 12-15% UE) (AMARAL; TOMAZELLO FILHO, 1998).

Para a obtenção do perfil radial de densidade aparente do lenho pela técnica de leitura direta utilizou-se o equipamento QTRS modelo 01X (Figura 1A). As amostras do lenho foram encaixadas em um suporte metálico e transferidas para o compartimento blindado do equipamento, seguindo-se as operações de autocalibração e de escaneamento contínuo (varredura) da seção transversal da amostra do lenho na direção medula-casca por um feixe colimado de raios X (Figura 1B). A intensidade dos raios X que atravessaram o lenho foi analisada e transformada em densidade aparente pelo *software* QMS. No processo de leitura das amostras do lenho, os valores pontuais de densidade foram apresentados com a respectiva imagem do lenho na tela do monitor. Os valores de densidade aparente do lenho originaram um arquivo DAT (relatório da análise com os valores de densidade aparente do lenho a cada 40 µm), sendo lido em planilha eletrônica e, na sequência, construídos os perfis radiais de densidade aparente do lenho (QMS, 1999; CASTRO, 2011).

Para a obtenção do perfil radial da densidade aparente do lenho utilizou-se, também, o equipamento de raios X digital modelo LX-60 (Figura 1 C, D). As amostras do lenho, utilizadas

na análise de densitometria de raios X por leitura direta, e uma cunha de calibração de acetato de celulose foram inseridas no compartimento blindado do equipamento de raios X, seguindo-se a operação de calibração e de leitura automática (30 Kv, 19 segundos), gerando-se imagens digitais do lenho juntamente com a cunha de calibração de elevado contraste e alta resolução na tela do monitor. Estas, posteriormente, foram salvas em formato TIF (FAXITRON, 2009) e analisadas com *software ImageJ* transformando-se, por comparação com a escala de tons de cinza da cunha, em valores de densidade aparente do lenho a cada 50 µm de distância ao longo da medula-casca, foram transferidos para planilha eletrônica e construídos os perfis radiais de densidade aparente do lenho (Figura 1E). Os defeitos do lenho presentes, como nós, microfissuras, biodegradação, entre outros, podem ser retirados durante processo de leitura das imagens digitais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de densidade aparente média do lenho das cinco árvores de pinus obtidos por meio das imagens digitais de raios X foram significativamente maiores do que os da densitometria de raios X por leitura direta (Tabela 1). A diferença da densidade aparente média do le-

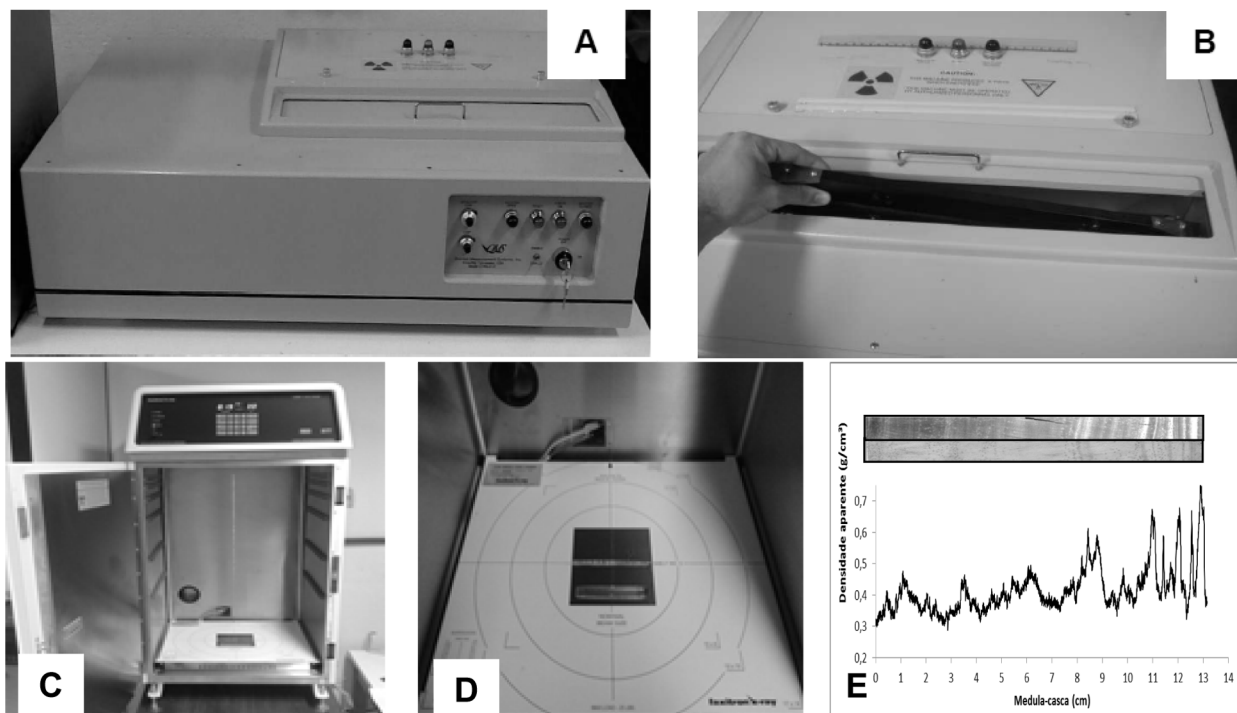


Figura 1. Equipamentos de raios X. QTRS-01X (A,B) equipamento e suporte metálico para a fixação das amostras do lenho no compartimento de irradiação; Faxitron LX-60 (C,D) equipamento e compartimento de irradiação das amostras do lenho; (E) perfil radial de densidade aparente do lenho de pinus.

Figure 1. X-Ray equipments. QTRS-01X (A,B) equipment and metal bracket to hold the wood specimens in the irradiation chamber; Faxitron LX-60 (C,D) equipment and irradiation chamber of the wood samples; (E) Radial wood density profile of pine.

no entre os métodos pode ser explicada pelo fato da análise de densitometria de raios X por leitura direta ocorrer de forma linear (contínua e radialmente) ao longo de todo o raio, não possibilitando a eliminação de possíveis defeitos como microfissuras nas amostras. As variações da largura e as imperfeições anatômicas do lenho dos anéis de crescimento e a presença dos canais de resina são, desta forma, acusadas pela passagem do feixe colimado de raios X e, quando registradas graficamente e em termos de média indicam menores valores da densidade aparente média, mínima e máxima do lenho.

Tabela 1. Valor médio da densidade aparente do lenho das cinco árvores de pinus, obtido pela densitometria de raios X e imagem digital de raios X.

Table 1. Mean values of wood apparent density of the five *Pinus* spp. trees, obtained by the two radiographic methods.

Árvores	Densidade aparente média do lenho (kg.m ⁻³)	
	Densitometria de raios X	Imagem digital de raios X
1	410 b ¹ (± 20; 5,60) ²	460 a (± 60; 12,66)
2	380 ab (± 10; 3,24)	430 a (± 20; 3,61)
3	340 a (± 5; 1,42)	400 a (± 10; 2,65)
4	370 ab (± 10; 3,46)	450 a (± 10; 3,24)
5	380 ab (± 50; 12,26)	440 a (± 80; 17,76)
Média	380 A (± 40; 9,51)	440 B (± 40; 10,27)

1. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). As letras minúsculas se referem aos valores das árvores e as letras maiúsculas aos valores dos métodos radiográficos; 2. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (kg.m⁻³) e coeficiente de variação (%), respectivamente

As diferenças na leitura sequencial do lenho pelo escaneamento dos raios X, pelas duas metodologias, podem ser constatadas pela comparação dos perfis de densidade aparente de uma mesma extensão do lenho de árvore de pinus (Figura 2). Os perfis diferem ligeiramente em algumas posições e apresentam diferenças de amplitudes (pontos máximos e mínimos). Tais diferenças podem ser explicadas pelas características técnicas dos equipamentos, uma vez que o equipamento de densitometria de raios X por leitura direta (QTRS-01X – Tree Ring Analyzer) utiliza tubo de raios X com tensão máxima de 50 kV e corrente de 150 μ A e o equipamento de imagem digital de raios X (Faxitron – LX60) utiliza tubo de raios X com tensão máxima de 60 kV e corrente de 300 μ A.

A correlação dos valores médios de densidade aparente do lenho das árvores de pinus obtidos pelos métodos de leitura direta e de imagem digital de raios X foi significativa e positiva (nível de 1%), com R de 0,84. A significância

estatística do modelo de regressão e o valor do coeficiente de correlação indicam que o valor médio da densidade aparente do lenho é correlacionado, embora, com diferença estatística significativa (Figura 3).

O completo perfil radial de densidade do lenho de árvore de pinus e sua respectiva imagem digital, resultado da diferença de atenuação dos feixes de raios X (Figura 4), permitem inferir sobre a estrutura anatômica dos anéis de crescimento, com maior acuidade em comparação com a análise macroscópica da sua seção transversal usualmente aplicada nos laboratórios de qualidade da madeira e de dendrocronologia. As regiões do lenho com variações marcantes de tonalidades de cinza e faixas de coloração mais clara, de diferentes espessuras, podem ser nitidamente observadas. As faixas de coloração clara, em número de sete, são características do lenho outonal dos anéis de crescimento anuais e coincidentes com a idade das árvores, propiciando a aplicação da metodologia em dendrocronologia (determinação da idade e taxa de crescimento das árvores) e qualidade do lenho (porcentagem do lenho tardio/anel de crescimento anual). O perfil radial de densidade permite determinar os valores crescentes de densidade aparente média, mínima e máxima dos anéis de crescimento anuais, sendo de 279-154-453; 326-274-507; 346-251-558; 382-292-675; 428-304-711; 495-329-841; 522-324-866 kg.m⁻³ para o 1º até o 7º ano de idade das árvores de pinus. Da mesma forma, caso seja foco da pesquisa, pode ser mensurada a espessura dos lenhos inicial-tardio e total dos anéis de crescimento anuais e construída a curva de crescimento em diâmetro do tronco e sua correlação com a densidade do lenho dos anéis de crescimento e do incremento anual de massa e de carbono. Em relação à estrutura anatômica do lenho das árvores de pinus verifica-se, ainda, pela imagem digital de raios X que (i) as regiões do lenho de maior densidade (de tonalidade mais clara: lenho tardio) são caracterizadas por traqueídes de parede celular espessa, menor largura e menor diâmetro do lume; as de menor densidade (de tonalidade mais escura: lenho inicial) são constituídas por traqueídes de parede celular delgada, maior largura e maior diâmetro do lume, (ii) ocorrem anéis de crescimento falsos mais característicos no lenho inicial; (iii) canais de resina distintos e mais frequentes no lenho tardio dos anéis de crescimento e (iv) parênquima radial em finas

linhas paralelas. A caracterização anatômica e física do lenho das árvores das espécies de pinus tem sido apresentada na literatura por outros autores (FERREIRA, 2009; FERREIRA; TOMAZELLO FILHO, 2009).

Por outro lado, o perfil radial de densidade aparente do lenho obtido a partir da densitometria de raios X por leitura direta (Figura 5) permite, da mesma forma, determinar o limite dos anéis de crescimento no lenho das árvores de pinus. Recomenda-se, no entanto, a justaposição da imagem da seção transversal do lenho para possibilitar a comparação com a estrutura

anatômica macroscópica dos lenhos (CHAGAS, 2013; ANHOLETTO JUNIOR, 2013).

Os perfis radiais de densidade aparente obtidos pelas duas metodologias indicam um modelo de variação caracterizado pelo menor valor de densidade aparente na região interna (310 kg.m^{-3}) em relação à externa (460 kg.m^{-3}) do lenho das árvores de pinus, a formação da madeira juvenil e transição madeira juvenil-adulta, além da presença dos anéis de crescimento anuais, em resposta da sazonalidade da atividade cambial e processo da xilogênese (TOMAZELLO FILHO et al., 2001).

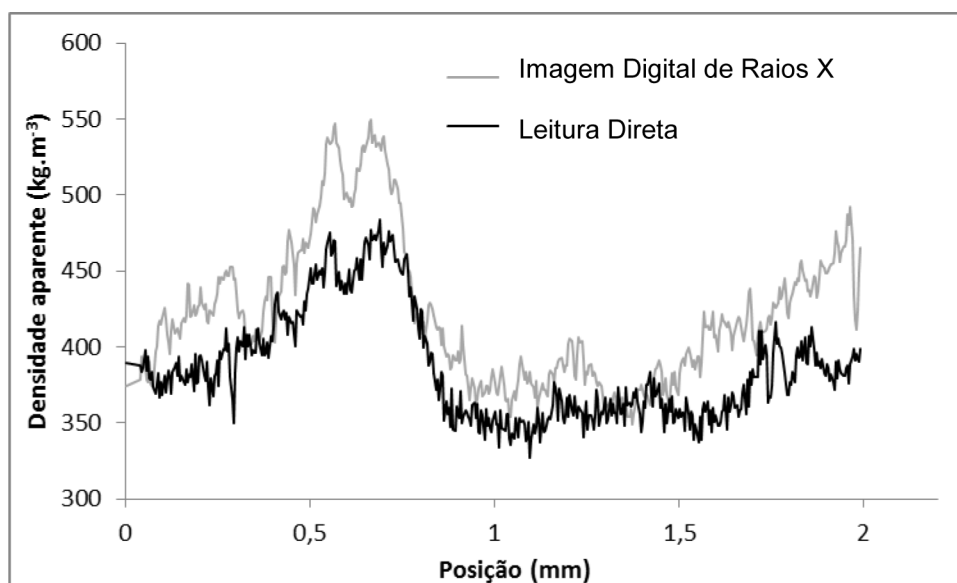


Figura 2. Perfis radiais de densidade aparente do lenho de árvore de pinus, obtidos pela densitometria de raios X (leitura direta) e imagem digital de raios X.

Figure 2. Radial profiles of wood density of pine trees, obtained by X-ray densitometry (direct reading) and digital image X-ray.

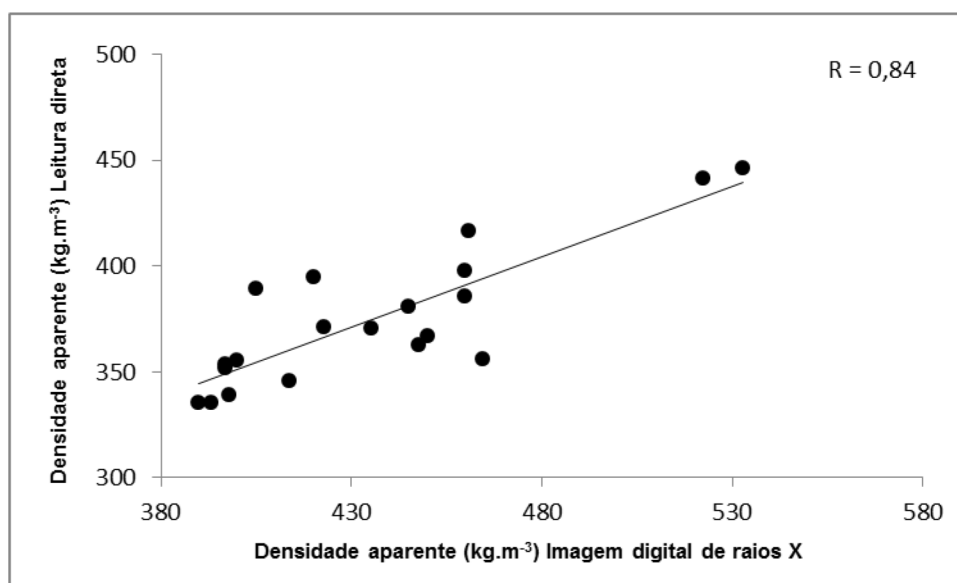


Figura 3. Correlação dos valores de densidade aparente do lenho das árvores de pinus, obtidos pela densitometria de raios X (leitura direta) e imagem digital de raios X.

Figure 3. Correlation of values of apparent wood density of pine trees, obtained by X-ray densitometry (direct reading) and digital image X-ray.

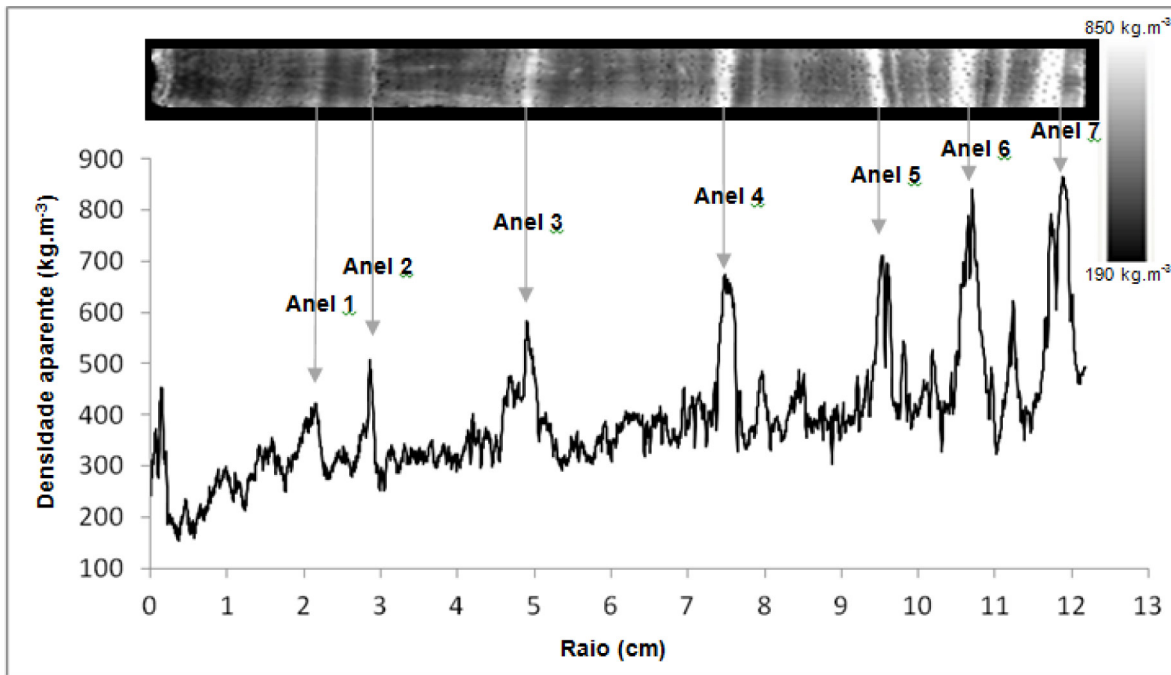


Figura 4. Perfil radial de densidade aparente do lenho de árvore de pinus obtido pela imagem digital de raios X.
Figure 4. Radial wood density profile of pine trees obtained by digital image X-ray.

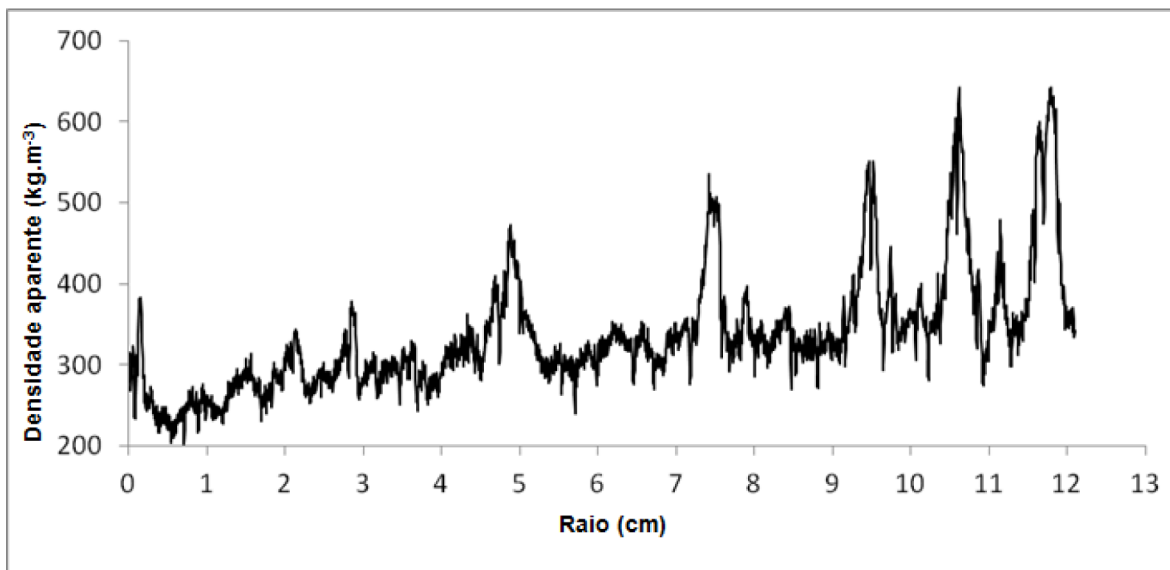


Figura 5. Perfil radial de densidade aparente do lenho de árvore de pinus obtido pela densitometria de raios X (leitura direta).
Figure 5. Radial wood density profile of pine trees obtained by X-ray densitometry (direct reading).

A comparação das metodologias de determinação da variação radial da densidade aparente do lenho (Tabela 2) permite inferir sobre as suas vantagens. Ressaltam-se, principalmente, a natureza dos dados (qualitativos e quantitativos), processo de calibração das leituras, área

de leitura do lenho na direção medula-casca, direcionamento da leitura no sentido radial e perpendicular aos anéis de crescimento, avaliação dos defeitos inerentes ao crescimento do tronco das árvores, tempo dedicado nas análises e custos dos equipamentos.

Tabela 2. Comparação das metodologias de determinação da densidade aparente do lenho de árvore de pinus: densitometria de raios X (leitura direta) e imagem digital de raios X.

Table 2. Comparison of methods for determining the wood apparent density of pine tree: X-ray densitometry (direct reading) and digital image X-ray.

Densitometria de raios X	Imagem digital de raios X
• Dados quantitativos	• Dados quantitativos e qualitativos
• Valores de densidade sem necessidade de cunha de calibração	• Valores de densidade necessitando de cunha de calibração
• Para análise de madeiras e produtos da madeira	• Análise de madeiras e produtos, sementes, folhas, insetos, etc.
• Análise de amostras de madeira - até 2x20x350 mm (espessura, largura, comprimento)	• Análise de amostras de madeira-área de 120x120 mm
• Leitura linear da densidade da amostra de madeira, em relação aos raios e anéis de crescimento	• Leitura linear da densidade da amostra de madeira, permite ajustar aos raios e anéis de crescimento
• Definição e contagem automática dos anéis de crescimento	• Definição e contagem manual dos anéis de crescimento
• Propicia resumo das variáveis estatísticas de densidade aparente média, máxima e mínima por anel e por amostra de madeira	• Propicia pelo ImageJ a relação dos valores de densidade em planilha eletrônica e posterior análise das variáveis por anel e por amostra de madeira
• Tempo de análise da amostra de madeira no equipamento, de 10-20 minutos, dependendo do comprimento	• Tempo de análise da amostra de madeira no equipamento, máximo de 19 segundos
• Equipamento de menor custo de aquisição	• Equipamento de maior custo de aquisição

CONCLUSÕES

Os perfis radiais de densidade aparente do lenho, obtidos pelos dois métodos radiográficos, foram similares, apresentando, porém, maior valor de densidade média utilizando as imagens digitais de raios X. O método radiográfico digital apresentou vantagens qualitativas como imagem em escala de cinza, localização de defeitos e rapidez de análise. Sendo assim, conclui-se que a radiografia digital pode ser utilizada para análise do perfil densitométrico, sendo indicada, principalmente em estudos de avaliação de qualidade do lenho que demandem grande quantidade de amostras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANHOLETTO JUNIOR, C. R. **Dendroecologia e composição isotópica (d13C) dos anéis de crescimento de árvores de *Cedrela odorata*, Meliaceae, na Caatinga e Mata Atlântica do Estado de Sergipe, Brasil.** 2013. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

AMARAL, A. C. B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira.** 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

AMARAL, A. C. B.; TOMAZELLO FILHO, M. **Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela microdensitometria de raios X.** *Revista Ciência e Tecnologia*, Piracicaba, v. 6, n. 11, p. 17-23, 1998.

ARIZAPANA-ALMONACID, M. A. **Avaliação do crescimento e da qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus urophylla*, de 8 anos, de teste de progênies, visando a produção de carvão vegetal.** 2013. 159 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais - Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira.** Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

BASCIETTO, M.; CHERUBINI, P.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G. **Tree rings from a European beech forest chronosequence are useful for detecting growth trends and carbon sequestration.** *Canadian Journal Forest Resource*, Ottawa, v. 34, n. 2, p. 81-492, 2004.

CASTRO, V. R. **Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.).** 2011. 108p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

- CHAGAS, M. P. **Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, SP.** 2013. 160p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- CHERUBINI, P.; HUMBEL, T.; BEECKMAN, H.; GARTNER, H.; MANNES, D.; PEARSON, C.; SCHOCH, W.; TOGNETT, R.; Olive Tree-Ring Problematic Dating: A Comparative Analysis on Santorini (Greece). **Plos One**, v. 8, n. 1, p. 1-5, 2013.
- FAXITRON. **User Manual Faxitron DX Radiography System.** 2009. 95 p.
- FERREIRA, A. T. B. **Caracterização da estrutura do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf.** 2009. 84 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- FERREIRA, A. T. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 287-298, 2009.
- HUGHES, J. F.; SARDINHA, R. M. A. The application of optical densitometry in the study of wood structure and properties. **Journal of Microscopy**, Oxford, v. 104, n. 1, p. 91-103, 1975.
- HUGHES, M. K. Dendrochronology in climatology—the state of the art. **Dendrochronologia**, Amsterdam, v. 20, n. 1/2, p. 95-116, 2002.
- KEUNECKE, D.; NOVOSSELETZ, K.; LANVERMANN, C.; MANNES, D.; NIEMZ, P. Combination of X-ray and digital image correlation for the analysis of moisture-induced strain in wood: opportunities and challenges. **European Journal of Wood and Wood Products**. Berlin, v. 70, n. 4, p. 407-413, 2012.
- LIN, C. J.; TSAI, M. J.; LEE, C. J.; WANG, S. Y.; LIN, L. D. Effects of ring characteristics on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of seven softwood species. **Holzforschung**, Berlin, v. 61, p. 414-418, 2007.
- MANNES, D.; LEHMANN, E.; CHERUBINI, P.; NIEMZ, P. Neutron imaging versus standard X-ray densitometry as method to measure tree-ring wood density. **Trees**, New York, v. 21, n. 6, p. 605-612, 2007.
- MOTHE, F.; SCIAMA, D.; LEBAN, J. M.; NEPVEU, G. Localisation de la transition bois initial - bois final dans un cerne de chêne par analyse microdensitométrique. **Annales des Sciences Forestières**, Champenoux, v. 4, n. 55, p. 437-449, 1998.
- POLGE, H. Study of wood density variations by densitometric analysis of X ray negatives of samples taken with a Pressler Auger. In: SYMPOSIUM OF IUFRO, 41, Melbourne, 1965. 19 p.
- QMS - QMS Tree Ring Analyzer Model QTRS-01X. Users Guide. Quintek Measurement Systems, Knoxville, TN. 1999.
- TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P. C.; LISI, C. S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. In: MAIA, N.B.; MARTOS, H.L.; BARRELLA, W. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações.** São Paulo: EDUC, 2001, p.117-143.
- TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P.; ROQUE, R. M. **Manual de aplicação de densitometria de raios-X em amostras de madeira, CRAD e CERD.** Piracicaba, 2005, 32 p.
- TRTIK, P.; DUAL, J.; KEUNECKE, D.; MANNES, D.; NIEMZ, P. 3D imaging of microstructure of spruce wood. **Journal of Structural Biology**, v. 159, n. 1, p. 46-55, 2007.
- VAN DEN BULCKE, J.; BOONE, M.; VAN ACKER, J.; VAN HOOREBEKE, L. Three-dimensional X-ray imaging and analysis of fungi on and in wood. **Microscopy and Microanalysis**, v. 15, n. 1, p. 395-402, 2009.
- VIANA, L. C. **Uso do infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus*.** 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- WOO, M. K; NORDAL, R. A. Commissioning and evaluation of a new commercial small rodent X-ray irradiator. **Biomedical Imaging and Intervention Journal**, v. 2, n. 1, p. 1-5, 2006.
- WU, D.; PENG, X. F. Investigation of water migration in porous material using micro-CT during wetting. **Heat Transfer - Asian Research**, v. 36, n. 4, p. 198-207, 2007.

Recebido em 01/08/2013
Aceito para publicação em 14/03/2014