

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**

**Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira**

**Luciana Cavalcante Pereira Rollo**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Recursos  
Florestais, com opção em Conservação de Ecossistemas  
Florestais**

**Piracicaba  
2009**

**Luciana Cavalcante Pereira Rollo**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira**

**Orientador:**  
**Prof. Dr. HILTON THADEU ZARATE DO COUTO**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Recursos  
Florestais, com opção em Conservação de Ecossistemas  
Florestais**

**Piracicaba**  
**2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Pereira-Rollo, Luciana Cavalcante  
Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira / Luciana Cavalcante  
Pereira Rollo. - - Piracicaba, 2009.  
48 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.  
Bibliografia.

1. Densidade da madeira 2. Madeira - Propriedades mecânicas 3. Tomografia I. Título

CDD 674.132  
P436t

**"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"**

### Dedico

A Deus, a minha mãe Emilse e a meu pai José Carlos, aos quais devo tudo que sou. A minha irmã Carla e a minha sobrinha Helena que me dão razões de sobra para viver. A meu esposo Francisco, companheiro para toda a vida.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Hilton Thadeu Zarate do Couto por incentivar minha iniciativa e indicar o caminho a ser seguido nesta pesquisa e na vida.

Ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP pela oportunidade de me aperfeiçoar no Curso de Mestrado. Ao Centro de Métodos Quantitativos - CMQ, onde encontrei todos os recursos necessários à pesquisa e meus companheiros por dois anos e talvez mais.

Agradeço a todos que me ensinaram algo, possibilitando que este trabalho fosse feito. Em especial a: Prof. Dr. Antonio Natal Gonçalves, Prof. Dr. Demóstenes Ferreira da Silva Filho, Prof. Dr. Geraldo Bortoletto Junior, Prof. Dr. João Luis Ferreira Batista, Prof. Dr. Sérgio Moraes de Oliveira, Dr. Jefferson Lordello Polizel, Msc Edgar de Souza Vismara, Msc Jaime Soto Mayor, Msc Moises Monteiro Lobão, Ana Carolina Barbosa de Lima, Eduardo Roberto Alexandrino, Francisco Martins de Almeida Rollo, Marcos Felipe Nicoletti, Rodrigo da Silva Matos, Tito Nunes de Castro.

À CAPES, pela bolsa de estudos.



## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
Referências.....	14
<b>2 CONCEITOS FÍSICOS ENVOLVIDOS NA TÉCNICA DE TOMOGRAFIA DE IMPULSO E A RELAÇÃO COM A DENSIDADE APARENTE</b>	<b>17</b>
Resumo.....	17
Abstract.....	17
2.1 Introdução.....	18
2.1.1 Propriedades físico-mecânicas da madeira e propagação de ondas mecânicas.....	19
2.1.2 Módulo de elasticidade.....	21
2.1.3 Densidade da madeira.....	22
2.1.4 Umidade da madeira.....	23
2.2 Material e Métodos.....	24
2.3 Resultados e discussão.....	25
2.4 Conclusão.....	30
Referências.....	30
<b>3 TOMOGRAFIA DE IMPULSO PARA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA EM ÁRVORES VIVAS</b>	<b>33</b>
Resumo.....	33
Abstract.....	33
3.1 Introdução.....	34
3.1.1 Tomografia de impulso.....	35
3.2 Material e Métodos.....	37
3.2.1 Coleta das amostras.....	37
3.2.2 Medições em laboratório.....	37
3.2.3 Variáveis analisadas.....	38
3.2.4 Estatística descritiva das variáveis.....	38
3.2.5 Modelagem estatística.....	42



3.3 Resultados e discussão.....	43
3.3.1 Equações resultantes.....	44
3.4 Conclusão.....	46
Referências.....	47

## RESUMO

### Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira

Há diversas técnicas que utilizam a passagem de ondas através da madeira para obtenção de informações. Dentre elas destaca-se a tomografia de árvores que reconstrói seções transversais de tronco e galhos. A tomografia de impulso, por sua vez, se baseia na cronometragem da viagem de ondas mecânicas sonoras entre sensores anexados em uma seção transversal da árvore, para cálculo da velocidade da onda e construção da imagem tomográfica. Sabe-se que a velocidade de passagem das ondas mecânicas é determinada pelas propriedades físico-mecânicas da madeira. Em especial: o módulo de elasticidade, a densidade e a umidade. Até o momento, há diversos estudos sobre a correlação entre a velocidade de onda (principalmente ultrassom) e o módulo de elasticidade. Os estudos apresentados a seguir se destacam por avaliar a correlação entre a velocidade de onda mecânica, obtida por tomografia de impulso, e a densidade da madeira, com vistas em utilizá-la como ferramenta na estimativa da densidade. Os diversos métodos consagrados para a determinação da densidade se caracterizam por utilizar amostras de madeira, que em muitos casos são de difícil obtenção. Além de serem executados procedimentos laboratoriais que podem levar até semanas. Dessa forma, no capítulo 2, ‘Conceitos físicos envolvidos na técnica de tomografia de impulso e a relação com a densidade aparente’, são feitas algumas considerações sobre os conceitos físicos que explicam o comportamento de ondas mecânicas e apresentada a correlação encontrada entre velocidade de onda mecânica e densidade aparente, a 12% de umidade da madeira, para três espécies de árvores de diferentes densidades (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake - Guapuruvu, *Eucalyptus saligna* Sm. - Eucalipto, *Caesalpinia echinata* Lam. – Pau-Brasil). Os resultados foram bastante satisfatórios, visto que o coeficiente de determinação -  $R^2$  da equação geral ‘velocidade de onda mecânica a 12% = 514,89 \* densidade aparente a 12% + 312,49’ foi igual a 0,9284, altamente significativo pelo teste F a 1%. No capítulo 3, ‘Tomografia de impulso para estimativa da densidade básica da madeira em árvores vivas’, são apresentados modelos estatísticos para estimativa da densidade básica da madeira em árvores vivas, por meio da velocidade de onda mecânica. Foram coletados dados a partir de árvores de 10 espécies nativas. As medidas de acurácia (coeficiente de determinação –  $R^2$ , erro médio percentual – EMP, e erro aleatório –  $\epsilon_i$ ) permitem afirmar que os modelos são úteis.

Palavras-chave: Densidade da madeira; Velocidade de onda mecânica; Tomografia de impulso; Densidade básica em árvores vivas; Conceitos físicos sobre ondas mecânicas



## ABSTRACT

### Impulse tomography for wood density estimate

There are several techniques which use the passage of waves through wood to obtain information. Among them the tomography of trees is emphasized, reconstructing cross sections of trunk and branches. The impulse tomography is based on the timing of mechanical sound wave travelling between sensors attached to a cross section of the tree, to compute wave speed and construction of the tomographic image. It is known that the speed of the passage of mechanical waves is determined by the physical and mechanical properties of the wood. Specially, elasticity module, density and moisture content. Until this moment, there are several studies about the correlation between wave speed (mainly ultrasound) and elasticity module. The studies presented next are highlighted because they evaluate the correlation between mechanical wave speed, obtained by impulse tomography, and wood density, with the intention to use it as a tool to estimate density. The several established methods for determining wood density are characterized by using wood samples, in many cases, difficult to obtain. Besides being performed using laboratory procedures which may take even weeks. Therefore, in chapter 2, 'Physical concepts involved in the impulse tomography method and the relationship with apparent density', there are considerations about physical concepts that explain the behavior of mechanical waves and present the correlation found between mechanical wave speed and apparent density, with 12% moisture content of the wood, to three species of wood with different densities (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake - Guapuruvu, *Eucalyptus saligna* Sm. - Eucalipto, *Caesalpinia echinata* Lam. – Pau-Brasil). The results were very satisfying, since the coefficient of determination -  $R^2$  the general equation 'mechanical wave speed at 12% = 514,89 \* apparent density at 12% + 312,49' was equal to 0,9284, highly significant regarding F test at 1%. In chapter 3, 'Impulse tomography for the estimation of basic wood density of live trees', statistical models for estimation are presented to estimate basic wood density in live trees, using mechanical wave speed. Data was collected from trees of 10 native species. The accuracy measurements (coefficient of determination -  $R^2$ , mean percentual error - EMP, and random error -  $\epsilon_i$ ) ensure the utility of the models.

Keywords: Wood density; Mechanical wave speed; Impulse tomography; Basic wood density of live trees; Physical concepts about mechanical waves



## 1 INTRODUÇÃO

A densidade é uma informação sobre a madeira de larga utilização, por ser de determinação fácil e barata e estar relacionada a outras propriedades físico-mecânicas. Influencia na definição do uso industrial apropriado da madeira, seja na produção de papel, carvão e energia (VITAL; VALENTE, 1986; SANTOS; SANSÍGOLO, 2007; MOKFIENSKI et al., 2008), na construção civil, na movelaria, ou na produção de painéis de MDF (DIAS; LAHR, 2004; BELINI et al., 2008). É uma variável importante em modelos estatísticos para estimativa da biomassa de ecossistemas e da emissão de gases do efeito estufa (FEARNSIDE, 1997; IPCC, 2006); além de servir como critério em programas de melhoramento genético e manejo florestal (FERREIRA; KAGEYAMA, 1978; THIERSCH et al., 2006), e na classificação das espécies na sucessão florestal (JORDAN, 1985).

O material madeira puro tem densidade igual a  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , praticamente constante para todas as espécies. Porém a madeira é porosa, e quando o volume de poros é incluído na determinação da densidade, esta é expressa principalmente de duas formas: densidade básica (massa seca / volume saturado) e densidade aparente a 12% de umidade (massa a 12% / volume a 12%) (VITAL, 1984). É uma característica que varia de acordo com a espécie, e nas direções base-topo e medula-casca das árvores (PANSHIN; de ZEEUW, 1970b).

Em termos gerais, a densidade da madeira depende: 1. do tamanho das células; 2. da espessura da parede da célula; 3. da interrelação entre o número de células de vários tipos em termos de (1) e (2). As fibras são particularmente importantes na determinação da densidade, suas diminutas seções transversais permitem um grande número delas em um pequeno lugar. Se as fibras são de parede grossa e lúmen pequeno, o total de espaços de ar é relativamente pequeno, e a densidade tende a ser maior. Por outro lado, se elas são de parede fina ou lúmen largo, ou ambos, a densidade será baixa. A baixa densidade pode também resultar de um grande volume de vasos na madeira, porém raramente (PANSHIN; de ZEEUW, 1970a).

Os métodos consagrados para a determinação da densidade envolvem a utilização de amostras de madeira, principalmente baguetas obtidas com sondas Pressler, e corpos de prova, discos, ou cunhas retirados após corte raso da árvore. Além da obtenção da amostra, é necessária a execução de procedimentos de laboratório, que em alguns casos podem levar semanas (VITAL, 1984; BONZATO; TOMAZELLO FILHO, 1998).

Os experimentos apresentados a seguir tiveram como objetivo avaliar a possibilidade do uso da tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira. Essa técnica é baseada na cronometragem e cálculo de velocidade de ondas mecânicas sonoras através da madeira, para a reconstrução de seções transversais do lenho. Sabe-se que a velocidade de onda mecânica é determinada pelas propriedades físico-mecânicas da madeira, dentre elas: módulo de elasticidade, densidade e umidade (BUCUR, 2006; RINNTECH, 2005). Foram analisados os dados de velocidade de onda mecânica para diferentes condições dessas propriedades.

## Referências

- BANZATTO, A.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* L. segundo a microdensitometria de raios-X. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 11/12, n. 11/12, p. 17- 23, 1998.
- BELINI, U.L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M.P.; DIAS, C.T.S. Caracterização da estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de painéis MDF. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 707-713, 2008.
- BUCUR, V. Environment modifiers of wood structural parameters detected with ultrasonic waves. In: \_\_\_\_\_. **Acoustics of wood**. Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 2006. chap. 9, p. 242-270.
- DIAS, F.M.; LAHR, F.A.R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 65, p. 102-113, jun. 2004
- FEARNSIDE, P.M. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 90, p. 59-87, 1997.
- FERREIRA, M.; KAGEYAMA, P.Y. Melhoramento genético da densidade da madeira de eucalipto. **Silvicultura**, São Paulo, v. 2, n. 14, p. 148-52, 1978.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Agriculture, forestry and other land use. In: \_\_\_\_\_. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. v. 4, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>> Acesso em: 04 nov. 2009.
- JORDAN, C.F. Factors which control nutrient cycles. In: \_\_\_\_\_. **Nutrient cycling in tropical forest ecosystems: principles and their application in management and conservation**. Chichester: John Wiley, 1985. chap. 1, p. 5-27.

MOKFIENSKI, A.; COLODETTE, J.L.; GOMIDE, J.L.; CARVALHO, A.M.L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 401-413, 2008.

PANSHIN, A.J.; de ZEEUW, C. The physical nature of wood. In: \_\_\_\_\_. **Textbook of wood technology**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970a. chap. 6, p. 200-236.

\_\_\_\_\_. Variability of wood within a species. In: \_\_\_\_\_. **Textbook of wood technology**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970b. chap. 7, p. 237-275.

SANTOS, S.; SANSÍGOLO, C.A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-63, jan./mar. 2007.

THIERSCH, C.R.; SCOLFORO, J.R.; OLIVEIRA, A.D.; REZENDE, G.D.S.P.; MAESTRI, R.. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 264-278, 2006.

VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

VITAL, B.R.; JESUS, E.M.; VALENTE, O.F. 1983. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, n. 2, p. 151-160, jul./dez. 1986.





## 2 CONCEITOS FÍSICOS ENVOLVIDOS NA TÉCNICA DE TOMOGRAFIA DE IMPULSO E A RELAÇÃO COM A DENSIDADE APARENTE

### Resumo

Atualmente, são muitos os métodos estudados para avaliação não-destrutiva da madeira. Dentre eles, destacam-se aqueles que utilizam as informações fornecidas pela passagem de ondas. A influência das características da madeira sobre as ondas de diversas naturezas tem sido intensamente estudada, permitindo que sejam estabelecidas correlações estatísticas entre o comportamento da onda e propriedades físicas e mecânicas da madeira. A tomografia é uma das técnicas em desenvolvimento que se baseia no comportamento de ondas para reconstrução de seções transversais de tronco e galhos. Especificamente, a tomografia de impulso utiliza informações dadas pela passagem de ondas mecânicas sonoras para produção do gráfico de superfície de seções transversais (imagem tomográfica). Neste estudo, foi analisada, por meio da análise de regressão, a correlação entre a densidade aparente da madeira, obtidos por densitometria de raios X, e a velocidade de onda mecânica, obtidos por tomografia de impulso, ao mesmo teor de umidade de 12%. Foram utilizadas amostras de seções transversais do tronco de árvores das espécies de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake - Guapuruvu, *Eucalyptus saligna* Sm. - Eucalipto, *Caesalpinia echinata* Lam. – Pau-Brasil, obtendo-se um gradiente de densidades. A equação linear geral para as três espécies ‘velocidade de onda mecânica a 12% = 514,89 x densidade aparente a 12% + 312,49’ apresentou coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,9284, significativo pelo teste F a 1%. São discutidos os conceitos físicos envolvidos na alta correlação entre essas variáveis, apresentando a tomografia de impulso como técnica viável para a estimativa da densidade da madeira.

Palavras-chave: Avaliação não-destrutiva; Técnica não-invasiva; Propriedades físico-mecânicas da madeira

### Abstract

Currently, the methods studied for non-destructive evaluation of the wood are many. Amongst them, those are distinguished that use the information supplied for the passage of waves. The influence of the characteristics of the wood on the waves of diverse natures has been intensely studied, allowing that statistical correlations between the behavior of the wave and physical and mechanical properties of the wood are established. The tomography is one of the techniques in development that bases itself on the behavior of waves for reconstruction of cross sections of trunk and branches. Specifically, the impulse tomography uses information given by the passage of mechanical waves to production of the surface graph of cross sections (tomographic image). In this study, it was analyzed, by means of the regression analysis, the correlation between the apparent wood density, gotten for x ray densitometria, and the speed of wave mechanics, gotten for impulse tomography, to 12% moisture content. Cross section samples of tree trunk of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake - Guapuruvu, *Eucalyptus saligna* Sm. - Eucalipto, *Caesalpinia echinata* Lam. – Pau-Brasil, getting a gradient of densities. The general linear equation for the three species ‘wave speed mechanics 12% = 514,89 x apparent density 12% + 312,49’ presented coefficient of determination -  $R^2$  equal the 0,9284, significant for F test 1%. The involved physical concepts in the high correlation between these

variables are argued, presenting the impulse tomography as viable technique for the estimate of the wood density.

Keywords: Non-destructive evaluation; Non-invasive technique; Physical and mechanical properties of the wood

## 2.1 Introdução

Nos últimos anos, vem crescendo a utilização de técnicas de análise da qualidade da madeira por meio de informações fornecidas pela passagem de ondas, que são perturbações da matéria que transportam energia. Em especial, a tomografia consiste na reconstrução de seções transversais de objetos por meio de informações fornecidas pela passagem de ondas, provenientes da superfície do objeto. Tanto ondas mecânicas como eletromagnéticas podem ser utilizadas para fornecer informações sobre o objeto: som e ultrassom, eletricidade, raios  $\gamma$  e raios x (NICOLOTTI et al., 2003; WANG; ALLISON, 2008). Assim é produzido o gráfico de superfície da seção transversal ou imagem tomográfica. A tomografia tem sido principalmente utilizada na análise da integridade do interior de árvores urbanas.

A tomografia de impulso (RINNTECH, 2005; PICUS, 2009) se baseia na cronometragem e cálculo da velocidade de ondas mecânicas sonoras para reconstrução de seções de tronco e galhos. Várias pesquisas têm sido realizadas para avaliar a eficiência dos tomógrafos de impulso na localização e estimativa do tamanho de defeitos e lesões na madeira de árvores em pé (GILBERT; SMILEY, 2004; DEFLORIO; FINK; SCHMARZE, 2008; WANG; ALLISON, 2008), bem como a confiabilidade das informações fornecidas pela cronometragem das ondas (PEREIRA et al., 2007). São equipamentos compostos por sensores que devem ser fixados em seções transversais da árvore e recebem pancadas de martelo para a produção do impulso. O tempo de percurso da onda entre os sensores é cronometrado e utilizado no cálculo da velocidade de propagação por meio do software, que gerencia os deslocamentos.

A velocidade de passagem da onda mecânica está correlacionada às propriedades físicas e mecânicas da madeira, como: módulo de elasticidade, densidade e umidade (GONÇALVEZ; VALLE; COSTA, 2001; CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; OLIVEIRA; SALES, 2005; BUCUR, 2006b).

### 2.1.1 Propriedades físico-mecânicas da madeira e propagação de ondas mecânicas

A madeira é um sólido ortotrópico, ou seja, possui três planos de simetria perpendiculares entre si. Portanto são três direções estruturais de propagação da onda mecânica: longitudinal, paralela às fibras; radial, paralela aos raios da seção transversal; e tangencial, paralela às camadas de crescimento anual. Por ser um material anisotrópico, o que significa que suas características variam com a direção, para cada impulso produzido sobre a madeira, a onda se propaga nas três direções com velocidades diferentes.

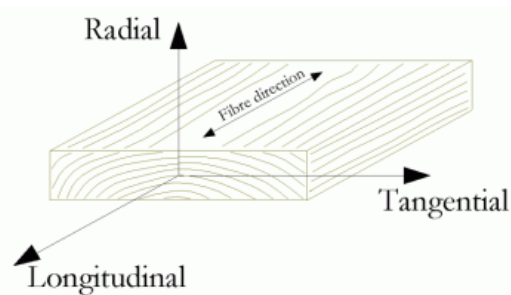


Figura 2.1 - Direções de simetria da madeira (Fonte: MORAIS, 2009)

Assim, em cada eixo de propagação, viajam: uma onda longitudinal, para qual as partículas da madeira oscilam paralelamente à direção de propagação da onda, e duas ondas transversais, em que as partículas oscilam perpendicularmente à direção de propagação. A avaliação do comportamento das ondas longitudinais é suficiente para o conhecimento das características da madeira (CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; GONÇALVEZ; VALLE; COSTA, 2001; BUCUR, 2006a). Para produção do gráfico de superfície pelo tomógrafo de impulso, importa o cálculo da velocidade das ondas mecânicas longitudinais na direção radial e tangencial.

As ondas mecânicas longitudinais, doravante denominadas ondas mecânicas, produzem regiões de compressão e descompressão do meio. Cada ciclo da onda (compressão-descompressão) é chamado de oscilação. A frequência, expressa em hertz (Hz), é o número de oscilações da onda por segundo. As ondas mecânicas ou acústicas são classificadas de acordo com suas frequências em: *infrassons*, produzidos por vibrações com frequências inferiores a 20Hz; *sons*, frequências entre 20Hz e 20kHz; e *ultrassons*, frequências superiores a 20kHz. O

intervalo de frequência entre 20Hz e 20kHz é audível aos seres humanos, servindo de referência para essa classificação.

Uma característica das ondas essencial à sua compreensão é que o aumento da frequência é proporcional à diminuição do comprimento da onda. A velocidade é a grandeza física que expressa o comportamento dessas variáveis:

$$V = \lambda f$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda (m/s)

$\lambda$  = comprimento de onda (m)

f = frequência da onda (número de oscilações/segundo)

Dessa forma a velocidade de propagação de ondas em um dado meio é constante, dependendo apenas das propriedades do meio. E as ondas são percebidas do mesmo modo a qualquer distância da fonte, ou seja, com a mesma frequência e comprimento.

A dedução da equação da velocidade das ondas mecânicas em função das características do material vem da combinação entre a 2ª Lei de Newton, onde força é igual à massa vezes aceleração, e a Lei de Hooke, que define o módulo de elasticidade. Para madeira, resulta simplificada que:

$$V = \sqrt{\frac{Ei}{D}}$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda mecânica (m/s)

E = módulo de elasticidade da madeira (N/m<sup>2</sup>)

D = densidade do material (kg/m<sup>3</sup>)

i = direção de propagação da onda (longitudinal, radial ou tangencial)

### 2.1.2 Módulo de elasticidade

A madeira, quando submetida à ação de forças, pode apresentar deformações que dependem do modo de aplicação das forças e das diferenças básicas na organização da madeira. Quando uma força atua sobre uma área ou volume é conhecida como tensão ( $\sigma$ ) e há três tipos de tensões primárias que podem ser consideradas: tensão de compressão, a força exercida reduz as dimensões do corpo; tensão de tração, a força tende a aumentar as dimensões do corpo; tensão de cisalhamento resulta de forças que tendem a causar o movimento em sentidos opostos de planos paralelos da madeira. Existe ainda a tensão de flexão que resulta da combinação das três tensões primárias (PANSHIN; de ZEEUW, 1970).

Em todos os materiais a tensão provoca uma deformação, que é expressa como a variação do comprimento longitudinal dividida pelo comprimento longitudinal inicial, quando o esforço é de tração ou de compressão. Quando o esforço é de flexão, o corpo sofre deflexão. A deformação ou deflexão elástica ( $\varepsilon$ ), que permanece apenas enquanto a força é exercida, é proporcional à tensão. Esta relação é expressa pela Lei de Hooke (1678):

$$\sigma = E \varepsilon$$

Onde:

$\sigma$  = tensão ( $\text{N/m}^2$ )

$E$  = módulo de elasticidade em flexão ( $\text{N/m}^2$ ), que pode ser substituído por módulo de Young ( $Y$ ) ( $\text{N/m}^2$ )

$\varepsilon$  = deformação ou deflexão (adimensional)

O módulo de elasticidade é uma medida da rigidez do material, indica a habilidade de um material de recuperar sua forma e tamanho original depois que a tensão é removida. O módulo de elasticidade para tensão de compressão ou tração é conhecido como módulo de Young ( $Y$ ), e o módulo de elasticidade para tensão de flexão é comumente indicado por  $E$  (PANSHIN; de ZEEUW, 1970). Para toda deformação longitudinal, ocorre uma deformação transversal. A relação entre a deformação transversal e a longitudinal é denominada coeficiente de Poisson. Quando não levado em consideração, o módulo de Young é muito próximo ao módulo de elasticidade em flexão (GONÇALVEZ; VALLE; COSTA, 2001).

Há muitos estudos sobre a correlação entre velocidade da onda mecânica, principalmente ultrassons, na direção longitudinal da madeira e módulo de elasticidade em flexão (GONÇALVEZ; VALLE; COSTA, 2001; CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; NOGUEIRA; BALLARIN, 2003; TARGA; BALLARIN; BIAGGIONI, 2005). Na direção radial, a velocidade da onda mecânica também permite a estimativa dessa propriedade. Na direção tangencial, a obtenção do módulo de elasticidade em flexão não é usual (GONÇALVEZ; VALLE; COSTA, 2001; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997).

A rigidez da madeira é determinada pela espessura da parede celular, pelo diâmetro das fibras e vasos, e pela umidade da parede celular, assim como a sua densidade (PANSWIN; de ZEEUW, 1970; CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003).

### **2.1.3 Densidade da madeira**

A madeira é um material poroso, e a determinação da densidade depende da inclusão ou não do volume dos poros. A densidade real da madeira ou densidade da parede celular é obtida sem a inclusão do volume dos poros e é igual a  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , variando muito pouco entre as espécies. Quando o volume é determinado de uma forma global, incluindo-se os poros, obtém-se a densidade aparente da madeira. A densidade aparente da madeira é expressa principalmente de duas formas: i) densidade básica – relação entre massa seca da madeira, obtida após secagem em estufa a  $103 \pm 5^\circ\text{C}$ , e o seu volume saturado, que significa o volume da madeira após corte e saturação em água; ii) densidade aparente – relação entre massa e volume da madeira a uma determinada umidade (U), variando de acordo com o valor de U, sendo que este é padronizado internacionalmente em 12%, pois é considerado o valor médio de equilíbrio da umidade da madeira com o ar (VITAL, 1984; REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1988).

A expressão da densidade a ser utilizada é determinada de acordo com a finalidade da informação. A densidade básica é, em geral, utilizada em inventários florestais para determinação da massa seca da floresta, uma vez que, em campo, o volume é uma das informações mais facilmente obtidas. Por sua vez, a densidade aparente a 12 % de umidade, doravante denominada densidade aparente, é utilizada em ensaios para caracterização físico-mecânica da madeira, permitindo conhecer o comportamento da madeira em condições ambientais (VITAL, 1984; REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1988; ABNT, 1997).

A densidade aparente é de fácil determinação para amostras pequenas, como as amostras das seções transversais do tronco obtidas por sonda Pressler, por meio da pesagem da amostra e medição de suas dimensões.

Um método consagrado e muito preciso aplicado a amostras diametrais para obtenção da densidade aparente é a densitometria de raios x. Amostras com 2 mm de espessura são homogeneizadas a 12% de umidade e radiografadas. Os filmes radiográficos são digitalizados e os valores milimétricos de densidade aparente são determinados pela diferença de tons de cinza ao longo do filme da amostra. Assim, é construído o respectivo gráfico do perfil de densidade aparente da amostra diametral (BANZATTO; TOMAZELLO FILHO, 1998).

A velocidade da onda mecânica é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade. Para madeira, no entanto, maiores densidades levam a maiores velocidades de impulso. Este comportamento é explicado pela constituição da madeira, o aumento na quantidade de parede celular por volume de madeira leva ao aumento mais pronunciado nos valores do módulo de elasticidade, que de densidade (CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; RINNTECH, 2005; BUCUR, 2006; PEREIRA et al., 2007).

O teor de umidade também influencia tanto a densidade quanto a rigidez da madeira.

#### **2.1.4 Umidade da madeira**

A madeira é um material higroscópico, portanto realiza trocas de água com o meio, absorvendo ou perdendo água até atingir o equilíbrio com a vizinhança. A umidade de equilíbrio da madeira depende das condições de temperatura e umidade do meio (PANSWIN e de ZEEUW, 1970). Sabe-se que em condições ambientes de 1 atm, 20°C e 65% de umidade relativa, a umidade de equilíbrio da madeira é 12% (CISTERNA, 1994).

A água na madeira pode estar: i. nos espaços vazios do interior das paredes celulares, é a água de adesão ou higroscópica; ii. dentro dos vasos, canais e lúmen das células, chamada de água de capilaridade ou livre. A madeira em condição de saturação possui seus vasos, canais e o lúmen das células repletos de água. Inicialmente, a diminuição da umidade é devida à evaporação da água de capilaridade ou água livre. Denomina-se ponto de saturação das fibras ou umidade de saturação ao ar quando permanece na madeira apenas a água de adesão.

A umidade de saturação ao ar - USA é uma umidade de referência a partir da qual as propriedades físicas e mecânicas da madeira são função do conteúdo de água. Há tendência ao



aumento do módulo de elasticidade e da densidade aparente com a diminuição da umidade, e, o inchamento e a retração ocorrem somente abaixo da USA, havendo estabilidade dimensional acima desse ponto. Este comportamento é compreensível quando se leva em consideração o aumento na concentração das substâncias sólidas da madeira quando as paredes celulares perdem água (PANSWIN; de ZEEUW, 1970; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Das três direções estruturais da madeira, a tangencial é a que sofre maiores alterações, seguida da radial, e da longitudinal, para a qual a variação é praticamente nula. O aumento da umidade acima do ponto de saturação das fibras, não altera significativamente as propriedades da madeira. De maneira geral, a USA está situada entre 25 e 32% de umidade, sendo o valor médio encontrado de 28% (PANSWIN; de ZEEUW, 1970; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Assim, a velocidade de propagação das ondas mecânicas tende a aumentar com a diminuição da umidade, mais intensamente abaixo da USA, justamente por causa do aumento causado sobre o módulo de elasticidade com maior intensidade que sobre a densidade aparente. Dessa forma, as maiores velocidades ultrassônicas são geralmente alcançadas em espécies de madeira de maiores densidades e menores teores de água (CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; OLIVEIRA; SALES, 2005; BUCUR, 2006b).

É analisada a seguir a correlação entre dados de densidade aparente obtidos por densitometria de raio x, e os dados de velocidade de onda mecânica, obtidos por tomografia de impulso, a 12% de umidade. Deseja-se demonstrar que os valores de velocidade de onda mecânica calculados pelo tomógrafo de impulso estão altamente correlacionados à densidade da madeira. Este resultado justifica que outros estudos sejam feitos para possibilitar o uso dessa técnica para estimativa da densidade da madeira.

### **2.3 Material e métodos**

Durante o mini-ciclone ocorrido no dia 06 de março de 2006 em Piracicaba - São Paulo – Brasil, houve a queda de algumas árvores numa mata adjacente ao Rio Piracicamirim localizada no interior do campus da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), coordenadas geográficas 22°42'26"S e 47°37'40"O. Pereira et al. (2007) selecionaram três árvores de diferentes espécies e densidades: *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake - Guapuruvu, *Eucalyptus saligna* Sm. - Eucalipto, *Caesalpinia echinata* Lam.- Pau Brasil, das quais foi cortado um torete de aproximadamente 30 cm de altura da região basal.

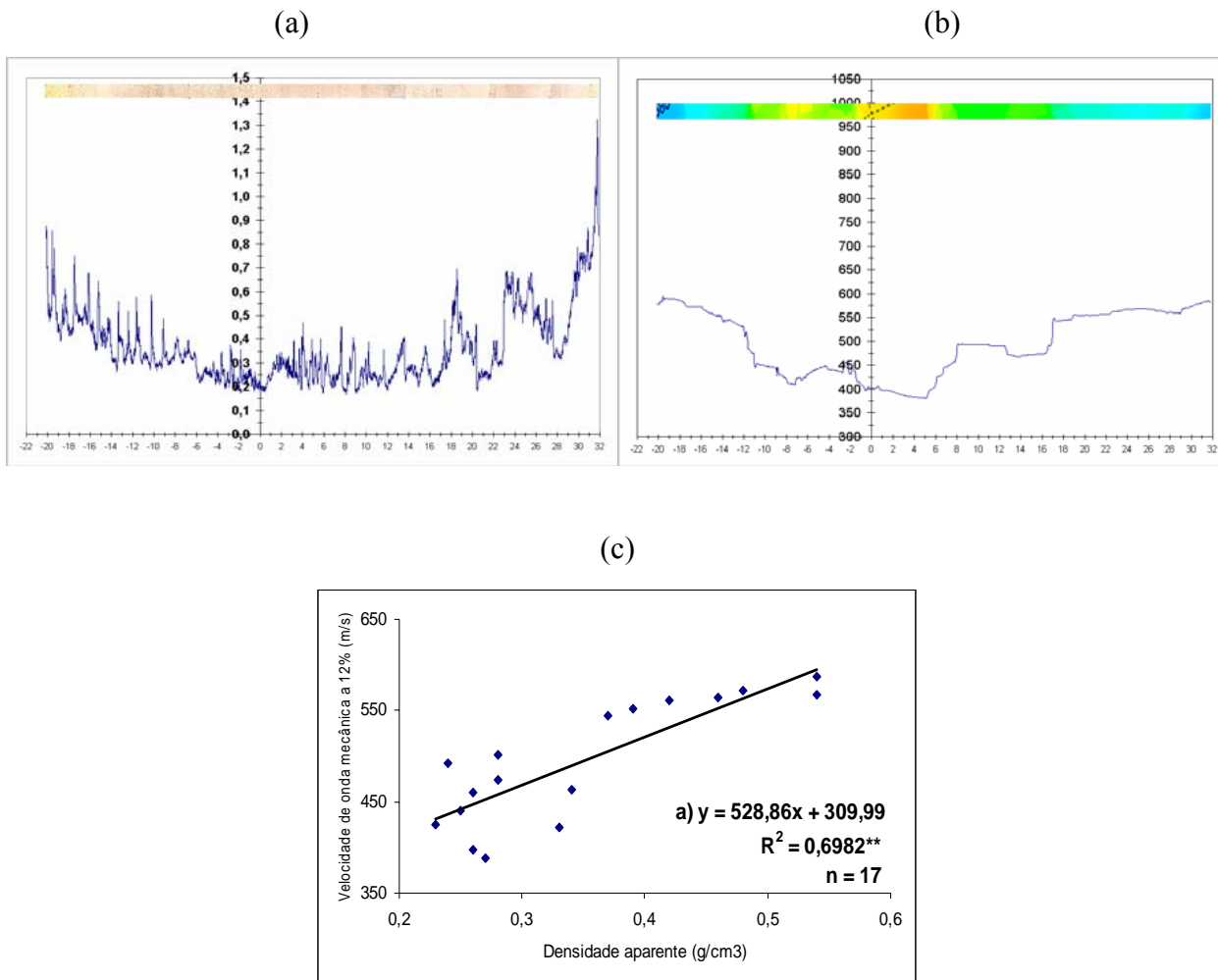
Foram produzidas imagens com o tomógrafo de impulso Arbotom<sup>®</sup> da seção transversal do meio de cada torete, durante o mês de agosto de 2006. Foi considerado que a madeira dos toretes alcançou a umidade de equilíbrio com o ar, ou seja, cerca de 12%. Dessa sessão, foi cortada uma amostra diametral para avaliação por densitometria de raio x (PEREIRA et al., 2007). Pela imagem tomográfica, foram obtidas as velocidades de onda mecânica ao longo da mesma amostra diametral que foi analisada por densitometria, de acordo com o método descrito em Pereira et al. (2007).

Assim foram construídos os gráficos de perfil de densidade aparente e de velocidade de onda mecânica, a 12%, para a mesma amostra diametral. Em seguida, foi construído o diagrama de dispersão de velocidade de onda mecânica versus densidade aparente dos valores médios para faixas de 3 cm da amostra diametral de cada espécie, acompanhado da respectiva equação linear e do coeficiente de determinação -  $R^2$ . Construiu-se também o diagrama de dispersão de todos os pontos. Foi aplicado o teste Tukey a 5% de probabilidade para comparação entre as médias.

#### 2.4 Resultados e discussão

Os gráficos de perfil de densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) e de velocidade de onda mecânica (m/s) das amostras diametraes de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, *Eucalyptus saligna* Sm., *Caesalpinia echinata* Lam. apresentaram tendência de distribuição dos pontos semelhante (Figura 2.2, 2.3, 2.4). No entanto, observa-se que a densitometria de raio x fornece informações mais detalhadas das amostras, enquanto a tomografia de impulso analisa regiões da madeira. Dessa forma, para comparação entre os dados, as amostras diametraes foram divididas em faixas de 3 cm, para as quais foram obtidas a densidade aparente média e a velocidade de onda média (PEREIRA et al.; 2007).

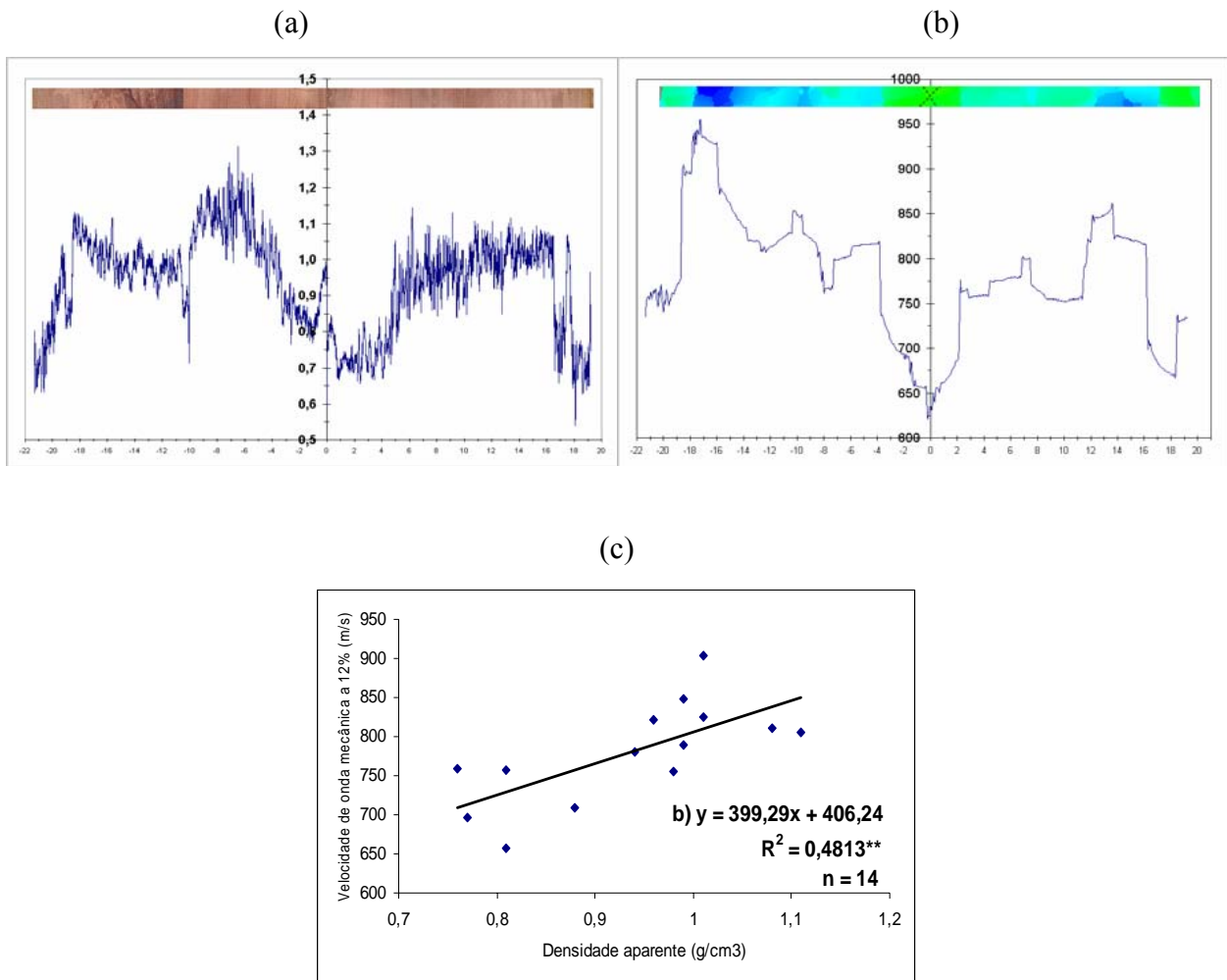
As velocidades de onda mecânica ( $V = \sqrt{\frac{Ei}{D}}$ ) aumentaram com o incremento da densidade aparente, o que está de acordo com Carrasco e Azevedo Júnior, 2003; RINNTECH, 2005; Bucur, 2006 e Pereira et al., 2007. Pois embora a densidade aumente, o módulo de elasticidade aumenta com maior intensidade, fazendo com que o quociente entre os dois seja favorável ao aumento da velocidade. A umidade é constante, portanto não interfere no relacionamento entre aquelas variáveis.



\*\* significativo pelo teste F a 1% de probabilidade.

n : número de pontos

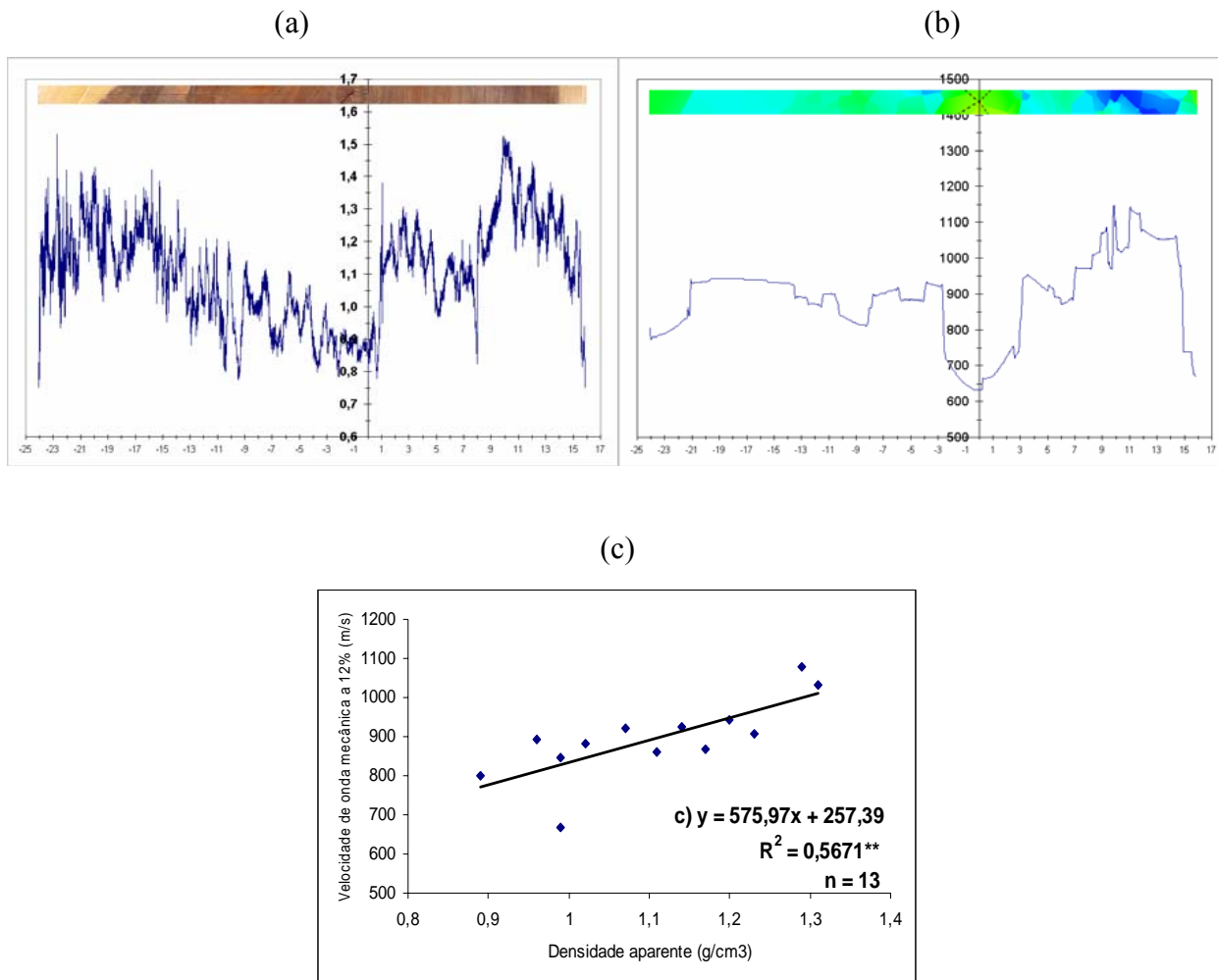
Figura 2.2 - Gráficos de perfil da amostra da espécie *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake: (a) posição da amostra (cm) x densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) a 12%; (b) posição da amostra (cm) x velocidade de onda mecânica (m/s) a 12%. (c) Diagrama de dispersão entre as médias de faixas de 3 cm da amostra diametral (adaptado de PEREIRA et al., 2007)



\*\* significativo pelo teste F a 1% de probabilidade.

n : número de pontos

Figura 2.3 - Gráficos de perfil da amostra da espécie de *Eucalyptus saligna* Sm.: **(a)** posição da amostra (cm) x densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) a 12%; **(b)** posição da amostra (cm) x velocidade de onda mecânica (m/s) a 12%. **(c)** Diagrama de dispersão entre as médias de faixas de 3 cm da amostra diametral (adaptado de PEREIRA et al., 2007)



\*\* significativo pelo teste F a 1% de probabilidade.

n : número de pontos

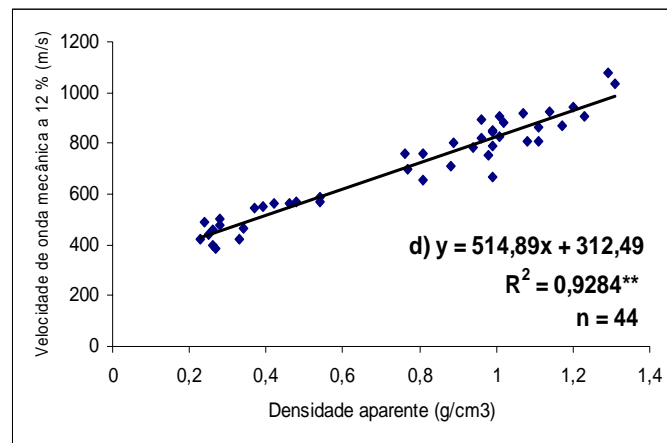
Figura 2.4 - Gráficos de perfil da amostra da espécie de *Caesalpinia echinata* Lam.: (a) posição da amostra (cm) x densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) a 12%; (b) posição da amostra (cm) x velocidade de onda mecânica (m/s) a 12%. (c) Diagrama de dispersão entre as médias de faixas de 3 cm da amostra diametral (adaptado de PEREIRA et al., 2007)

Os dados demonstram que quanto menor a variação da densidade aparente ao longo da amostra (Figura 2.2), maior o coeficiente de determinação -  $R^2$  da equação. Como o tomógrafo de impulso trabalha por regiões da madeira, reconhece faixas de densidade ao longo da amostra (Figura 2.3 e 2.4).

Para estimativa da densidade da madeira, é conveniente que sejam utilizadas informações obtidas a partir de árvores íntegras. Os tecidos de lesões ou defeitos não são representativos da espécie, além de constituírem áreas de grande variação da densidade que diminuem a precisão do equipamento.

Os coeficientes angulares e lineares são próximos para as equações (a) *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake - densidades baixas - e (c) *Caesalpinia echinata* Lam. - densidades altas. Percebe-se que não importa a densidade da amostra para que os valores de velocidade de onda mecânica, calculados pelo tomógrafo de impulso, se correlacionem às densidades aparentes, obtida por densitometria de raio x.

Construindo-se um único diagrama de dispersão (Figura 2.5) para todos os dados coletados, o  $R^2$  é de 0,9284, significativo pelo teste F a 1%. Portanto, há alta correlação entre densidade aparente e velocidade de onda mecânica, a 12% de umidade da madeira.



\*\* Significativo pelo teste F a 1% de probabilidade.

n: número de pontos

Figura 2.5 - Diagrama de dispersão da densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) vs. velocidades de onda mecânica (m/s), a 12% de umidade. Médias de faixas de 3 cm das amostras diametrais, para todas as espécies

Os coeficientes da equação geral (d)  $y = 514,89x + 312,49$  também se aproximaram dos coeficientes das equações (a)  $y = 528,86x + 309,99$  e (c)  $y = 575,97x + 257,39$ , demonstrando a

coerência entre as medições realizadas pelo tomógrafo de impulso, mesmo quando na massa de dados há aqueles advindos de amostras com maior variabilidade da densidade aparente, desde que não seja muito pronunciada, como em lesões e defeitos da madeira.

É interessante constatar que a média dos valores de coeficiente linear das quatro equações é igual a 321,53 m/s. Este valor é muito próximo à velocidade das ondas mecânicas no ar (343 m/s), situação equivalente a dizer que a densidade da madeira seria igual a 0 g/cm<sup>3</sup>, demonstrando a precisão do equipamento.

## 2.5 Conclusões

O aumento da densidade aparente leva ao aumento mais pronunciado do módulo de elasticidade da madeira, o que resulta em maiores valores de velocidade de onda mecânica.

As equações para uma única espécie ou generalizada para todas as espécies foram muito parecidas quando não houve grande variação da densidade dentro da amostra diametral, revelando dois aspectos:

- a. a tomografia de impulso é uma ferramenta eficiente para estimativa da densidade da madeira, por meio da velocidade de onda mecânica;
- b. quanto mais homogeneia a densidade da madeira ao longo da seção transversal, mais precisas serão as informações do tomógrafo de impulso. Porém desde que as variações na densidade não sejam extremas, como em lesões e defeitos da madeira, não impedem que os dados de tomografia de impulso sejam utilizados. Pois estes, de forma geral, refletem satisfatoriamente as propriedades da madeira.

É possível estimar a densidade da madeira pelo uso de equações que correlacionem velocidade de onda mecânica e densidade, a uma mesma umidade, utilizando tomografia de impulso. Novos estudos são necessários para ampliar a usabilidade da tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira.

## Referências

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

BANZATTO, A.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* L. segundo a microdensitometria de raios-X. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 11/12, n. 11/12, p. 17- 23, 1998.

BUCUR, V. Theory of and experimental methods for acoustic characterization of wood. In: \_\_\_\_\_. **Acoustics of wood**. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006a. chap. 4, p. 39-104.

\_\_\_\_\_. Environment modifiers of wood structural parameters detected with ultrasonic waves. In: \_\_\_\_\_. **Acoustics of wood**. 2<sup>nd</sup> ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006b. chap. 9, p. 242-270.

CARRASCO, E.V.M.; AZEVEDO JÚNIOR, A.P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som: fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.

CISTERNA, P.A. Conversion de densidades de la madera. **Ciência e Investigación Forestal**, Chile, v. 8, n. 2, p. 300-315, 1994.

DEFIORIO, G.; FINK, S.; SCHMARZE, F.W.M.R. Detection of incipient decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 42, n. 2, p. 117-132, 2008.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111 p.

GILBERT, E.A.; SMILEY, T. Picus sonic tomography for the quantification of decay in White Oak (*Quercus alba*) and Hickory (*Carya spp.*). **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 30, n. 5, p. 277-281, 2004.

GONÇALVES, J.C.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. da. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001.

MORAIS, J.J. **Direções de simetria material**: comportamento mecânico não-linear da madeira. Disponível em: <<http://home.utad.pt/~jmcx/nlmbwood/Projecto.htm>> Acesso: 03 dez. 2009.

NICOLOTTI, G.; SOCCO, L.V.; MARTINIS, R.; GODIO, A.; SAMBUELLI, L. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 29, n. 2, p. 66-78, 2003.

NOGUEIRA, M.; BALLARINI, A.W. Correlações entre módulos de elasticidade estático (flexão) e dinâmico (ultra-som) para algumas espécies de Eucalipto. **Floresta**, Curitiba, v. 33, n. 1, p. 19-25, 2003.

OLIVEIRA, F.G.R. de; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultrassônica da madeira. **Minerva**, São Carlos, v. 2, n. 1, p. 25-31, 2005.



PANSHIN, A.J.; de ZEEUW, C. The physical nature of wood. In: \_\_\_\_\_. **Textbook of wood technology**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970. chap. 6, p. 200-236.

PEREIRA, L.C.; SILVA FILHO, D.F.; TOMOZELLO FILHO, M.; COUTO, H.T.Z. do Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **REVSBAU**, Piracicaba, v. 2, n. 2, p. 65-75, 2007.

PICUS. **Picus home page**. Disponível em: <<http://www.picus-online.de/picus/system/stomgrd.htm>> Acesso: 13 mar. 2009.

REZENDE, M.A.; ESCOBEDO, J.F.; FERRAZ, E.S.B. Retratabilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 39, p. 33-40, ago. 1988.

RINNTECH. **User Manual – Arbotom® 3-D Tree Impulse Tomograph, version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP**. Heidelberg, 2005. 42 p.

TARGA, L.A.; BALLARIN, A.W.; BIAGGIONI, M.A.M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.

VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

WANG, X.; ALLISON, B. Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 34, n. 1, p. 1-4, 2008.

### 3 TOMOGRAFIA DE IMPULSO PARA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA EM ÁRVORES VIVAS

#### Resumo

Por meio do inventário da biomassa arbórea, são feitas estimativas do volume de gás carbônico armazenado, emitido ou seqüestrado pelas árvores dos diversos ecossistemas. Os recursos da análise de regressão podem viabilizar a estimativa dessa variável, facilitando os trabalhos de campo e acelerando a obtenção de informações. Sabe-se que os modelos estatísticos para estimativa da biomassa arbórea que apresentam os melhores resultados são aqueles que incluem a densidade da madeira. Porém esta variável tem sido de difícil obtenção para indivíduos em pé. Neste trabalho, são apresentados modelos estatísticos que permitem estimar a densidade básica de árvores vivas, por meio da correlação entre densidade básica e velocidade da onda mecânica na madeira. A tomografia de impulso é a técnica utilizada para obtenção da velocidade da onda mecânica, por ser eficiente e precisa nos cálculos dessa variável. São coletados dados a partir de amostras de discos de 10 espécies de árvores nativas de diversas densidades. Estes discos foram saturados em água e posteriormente passaram por um processo de secagem e produção de imagens tomográficas em diferentes umidades. Os melhores modelos estatísticos foram:  $\ln DB = 1,25843 - 1143,43539 \times (1/V) - 0,00035376 \times D^2$ , equação única;  $\ln DB = 0,38576 - 756,39114 \times (1/V) - 0,00018424 \times D^2$ , para  $0,20 \leq DB \leq 0,50 \text{ g/cm}^3$ ;  $\ln DB = -2,27846 + 0,26429 \times \ln V - 0,00024790 \times D^2$ , para  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$ . Onde: DB = densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ ); V = velocidade de onda mecânica (m/s); D = diâmetro da seção transversal (cm).

Palavras-chave: Estimativa da densidade básica; Árvores vivas; Velocidade de onda mecânica; Métodos não-destrutivos; Técnicas não-invasivas

#### Abstract

Estimates of carbonic gas volume storage, emitted or retained by trees of diverse ecosystems, are performed using tree biomass inventory. The regression analysis resources may bring about the estimation of this variable, facilitating field work and accelerating data attainment. It is known that the statistical models to estimate tree biomass have the best results with the inclusion of wood density. However, this has been a variable of difficult obtainment for standing individuals. In this study, statistical models that allow basic wood density estimation of live trees are presented, using the correlation between basic density and mechanical wave speed in wood. The impulse tomography is the technique used for mechanical wave speed obtainment, since it is effective and precise in computing this variable. Data is collected from disc samples of 10 native tree species of different densities. These discs were saturated in water and afterward went under a process of drying and tomographic image production in different moisture contents. The best statistical models were:  $\ln DB = 1,25843 - 1143,43539 \times (1/V) - 0,00035376 \times D^2$ , single equation;  $\ln DB = 0,38576 - 756,39114 \times (1/V) - 0,00018424 \times D^2$ , for  $0,20 \leq DB < 0,50 \text{ g/cm}^3$ ;  $\ln DB = -2,27846 + 0,26429 \times \ln V - 0,00024790 \times D^2$ , for  $0,50 \leq DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$ . Where: DB = basic wood density ( $\text{g/cm}^3$ ); V = mechanical wave speed (m/s); D = cross section diameter (cm).

Keywords: Basic wood density estimative; Live trees; Mechanical wave speed; Impulse tomography; Non-destructive methods; Non-invasive techniques

### 3.1 Introdução

Estudos científicos revelaram que as emissões de gases do efeito estufa - GEE realizadas pelo homem estão contribuindo para um aumento exagerado da temperatura mundial, levando a mudanças climáticas de grande impacto (IPCC, 2007).

O Protocolo à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima, adotado na 3ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento - UNFCCC realizada em Kioto – Japão, em dezembro de 1997, conhecido como Protocolo de Kioto, foi elaborado com base no relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC divulgado em 1995, visando à redução das emissões de GEE. Propõe aos países desenvolvidos, uma meta de reduzir em 5,2% suas emissões, em relação ao ano de 1990, até 2012.

Durante a 13ª UNFCCC, em Bali – Indonésia, realizada no final de 2007, começou a ser elaborado o substituto do Protocolo de Kioto. Prevê-se que as reduções de emissões propostas sejam de 20% das emissões de GEE, em relação a 2005, até 2020 (VEJA, 2008; GARCIA, 2009).

O inventário do volume de GEE emitido, seqüestrado ou armazenado em seus reservatórios é essencial para a elaboração de projetos que objetivam a redução ou o seqüestro das emissões. Em especial, para o inventário em florestas e plantações florestais, o IPCC apresenta uma metodologia de referência em seu ‘2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, forestry and other land use’, que envolve estimativas de mudanças no estoque de carbono de cinco compartimentos: biomassa acima do solo; biomassa abaixo do solo; matéria orgânica ou madeira morta; serrapilheira; matéria orgânica do solo. Para tanto, são fornecidos valores-padrão para variáveis, como biomassa acima do solo em florestas e plantações florestais (toneladas de massa seca / ha), e densidade básica da madeira de espécies tropicais (toneladas de massa seca / m<sup>3</sup> de madeira saturada).

A utilização de valores-padrão é interessante quando as metodologias para obtenção das variáveis envolvidas no inventário são de difícil execução. Por exemplo, a biomassa arbórea de florestas e plantações florestais é tradicionalmente obtida pelo método direto e destrutivo, que consiste no corte raso e pesagem de árvores individuais ou todos os indivíduos presentes em parcelas, de acordo com o inventário florestal, seguidos de secagem de amostras dos seus compartimentos (raiz, tronco, galhos, folhas, sementes e frutos) para obtenção da porcentagem de

massa seca (SOARES et al., 1996; SANQUETTA; BALBINOT, 2004). Para determinação da densidade básica, geralmente é utilizado o ‘método da balança hidrostática’, baseado no princípio de Arquimedes, no qual são utilizadas amostras de discos retiradas após o corte raso da árvore. Estes são saturados em água e pesados ao ar e submersos em água para obtenção do volume saturado; após completamente secos em estufa são novamente pesados, e então é calculada a densidade básica pela relação massa seca: volume saturado (VITAL, 1984).

Em florestas naturais, estimativas diretas se tornam caras, demoradas e dependentes de recursos humanos adequados, devido às dimensões das árvores. E a legislação ambiental vigente, visando proteger os ecossistemas, dificulta o corte. Mesmo em plantações florestais, com poucas espécies, o método destrutivo exige um intenso trabalho de campo (MOREIRA-BURGER; DELITTI, 1999; SANQUETTA; BALBINOT, 2004).

Entretanto a biomassa arbórea das florestas ou plantações florestais, bem como a densidade básica das espécies, varia de acordo com fatores do sítio (clima, solo), características genéticas, com o tipo de ecossistema, estágio de desenvolvimento e práticas de manejo. A biomassa expressa o potencial de acumulação de energia e nutrientes pela biota em interação com fatores ambientais (ODUM, 1988; MOREIRA-BURGER; DELITTI, 1999; IPCC, 2006), tornando impossível aos valores-padrão expressar a pluralidade de situações encontradas.

Atualmente, recursos da análise de regressão são utilizados para obtenção de modelos estatísticos para estimar a biomassa de árvores em pé, por meio de métodos indiretos e não destrutivos. Os modelos que apresentam os melhores resultados são aqueles que incluem a densidade da madeira. Porém, até o momento, esta variável tem sido de difícil obtenção para indivíduos vivos (HIGUCHI et al., 1998; MOREIRA-BURGER; DELITTI, 1999; GUARINO; MEDEIROS, 2005).

Neste trabalho são apresentadas equações para estimativa da densidade básica em árvores em pé, obtidas por meio da correlação entre velocidade de onda mecânica e densidade da madeira (ver capítulo 2). A tomografia de impulso é a técnica utilizada para a coleta de dados de velocidade de onda mecânica.

### **3.1.2 Tomografia de impulso**

A tomografia de árvores consiste na técnica de reconstrução de seções transversais de tronco e galhos por meio de informações fornecidas pela passagem de ondas através da madeira.

Tanto ondas mecânicas como eletromagnéticas podem ser utilizadas: som e ultrassom, eletricidade, raios  $\gamma$  e raios x (NICOLOTTI et al., 2003; WANG; ALLISON, 2008). Na tomografia de impulso, são utilizadas ondas mecânicas sonoras para obtenção de informações (RINNTECH, 2005; PICUS, 2009).

Os tomógrafos de impulso são equipamentos compostos por sensores, que são fixados a uma seção transversal da árvore, e recebem pancadas de martelo para produção do pulso que viajará através da madeira. O tempo de percurso do pulso entre os sensores é cronometrado, e o software que gerencia os deslocamentos calcula a velocidade da onda mecânica. O gráfico de superfície da seção transversal, ou imagem tomográfica, é produzido por meio dos valores de velocidade de onda calculados (RINNTECH, 2005; PICUS, 2009).

A velocidade da onda mecânica é determinada pelas propriedades físico-mecânicas da madeira, dentre elas: densidade, umidade e módulo de elasticidade. No capítulo 2, é abordado como estas características influenciam o comportamento da onda mecânica e é apresentada a alta correlação encontrada entre densidade aparente e velocidade da onda mecânica, a 12% de umidade.

Sabe-se que a velocidade da onda mecânica em condições secas (12% de umidade) é sempre maior que a velocidade em condições de saturação da madeira. A perda de água propicia o aumento do módulo de elasticidade, da densidade, e da velocidade da onda mecânica. Para teores de água acima da umidade de saturação ao ar (USA), as características físico-mecânicas da madeira são afetadas com menor intensidade que abaixo da USA (OLIVEIRA; SALES, 2005; OLIVEIRA et al., 2005; BUCUR, 2006).

Em árvores vivas, a umidade da madeira varia de acordo com a disponibilidade de água no ambiente. Gartner; Moore; Gardiner (2004) encontraram cernes com até 60% do seu volume ocupado por ar, e o volume de alburnos ocupados em até 80% por água. Porém os tecidos arbóreos em campo não apresentam umidades abaixo da USA, quando a madeira passa a perder a água de adesão, presente no interior das paredes celulares (PANSHIN; de ZEEUW, 1970a; GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

## 3.2 Material e Métodos

### 3.2.1 Coleta de amostras

A coleta de amostras foi realizada na Reserva Natural da Vale localizada ao norte do Estado do Espírito Santo - predominantemente no município de Linhares e com uma pequena porção nos municípios de Sooretama e Jaguaré. Sua área total é de 22.000 ha, estando geograficamente compreendida entre os paralelos 19°06'' - 19°18'' S e meridianos 39°45'' - 40°19'' O.

Das áreas recuperadas com essências nativas da reserva, foram selecionadas 10 espécies: *Caesalpineia ferrea* Mart. Ex. Tul – Pau-ferro; *Pterocarpus violaceus* Vogel – Pau-sangue; *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur. – Ipê Felpudo; *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake – Guapuruvu; *Pterygota brasiliensis* Fr. All. – Farinha seca; *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud – Louro pardo; *Astronium graveolens* Jacq. – Aderne; *Joannesia princeps* Vell. - Boleira; *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze – Jequitibá rosa; *Dalbergia nigra* (Vell.) Allemao ex Benth. - Jacarandá.

Realizou-se o corte raso de 2 indivíduos íntegros de cada espécie (como indicado no capítulo 2) com aproximadamente 20 cm de DAP. Foram retirados 3 discos com cerca de 15 cm de espessura de cada indivíduo, tomados na base, à altura do DAP (1,30m) e à altura comercial – correspondente a 5 cm de diâmetro ou à primeira ramificação. Os discos foram embalados em sacos plásticos para evitar perda de umidade e transportados para o laboratório.

### 3.2.2 Medições em laboratório

Foram colocados 56 discos em tambores com água até que o processo de saturação estivesse concluído, quando o peso dos discos tornou-se constante.

Posteriormente, procedeu-se em cada disco: a medição do peso ao ar e do peso submerso em água em balança com precisão de 0,01g, para cálculo do volume saturado pelo Princípio de Arquimedes e da umidade relativa à base seca do disco; a medição de 4 diâmetros de uma das seções transversais externas com régua de alumínio com precisão milimétrica; a produção de imagem tomográfica de seção transversal do meio do disco com tomógrafo de impulso Arbotom<sup>®</sup>, estando os sensores colocados equidistantemente a cada 4 - 6 cm ou até que completassem 12; e secagem em estufa de circulação forçada a 55°C por 6h.

Após resfriamento dos discos à temperatura ambiente, foram feitas: medição do peso ao ar em balança com precisão de 0,01g, para cálculo da umidade relativa à base seca do disco; a medição dos mesmos 4 diâmetros da seção transversal externa com régua de alumínio com precisão milimétrica; a produção de imagem tomográfica da seção transversal do meio do disco com sensores na mesma posição; e secagem em estufa de circulação forçada a 55°C por 12h. Estes procedimentos foram repetidos 5 vezes, totalizando 6 imagens por disco.

Por fim, os discos foram levados à estufa de circulação forçada a 103°C por 48h para secagem total. Após resfriamento, foram pesados ao ar para obtenção do peso seco e determinação da densidade básica.

### 3.2.3 Variáveis analisadas

Após as mensurações, os dados foram organizados por imagem tomográfica do disco. Foram obtidas as seguintes variáveis: (i) a velocidade de onda mecânica da imagem, calculada por meio da média aritmética dos dados da matriz de velocidade de onda mecânica entre os sensores, fornecida pelo software do tomógrafo de impulso; (ii) a umidade relativa à base seca do disco no momento da produção da imagem, por meio da fórmula  $U = (\text{peso úmido} - \text{peso seco}) / \text{peso seco}$ ; (iii) a densidade básica do disco, dada pela fórmula  $DB = \text{massa seca} / \text{volume saturado}$ ; (iv) o diâmetro do disco, por meio da média aritmética dos 4 diâmetros medidos no momento da produção da imagem; (v) as frações volumétricas de madeira (M), gás (G) e água (A) nos discos no momento da produção da imagem, calculadas de acordo com Gartner, Moore e Gardiner (2004).

Gartner, Moore e Gardiner (2004) determinam a fração madeira da amostra (M) por meio da divisão da densidade básica pela densidade do material madeira puro (1,53 g/cm<sup>3</sup>, praticamente constante para todas as espécies); a fração água (A) como igual ao volume de água na amostra dividido pelo seu volume total; a fração gás da amostra (G) sendo  $1 - (M + A)$ .

Foram considerados apenas os dados das amostras com umidade acima da USA (28%), para que se aproximassem às condições de campo.

### 3.2.4 Estatística descritiva das variáveis

A estatística descritiva de todos os dados coletados das variáveis analisadas (n = 284) é apresentada na Tabela 3.1 e 3.2. Posteriormente, os dados foram divididos em duas classes de

densidade básica - DB: (a)  $0,20 \leq DB \leq 0,50 \text{ g/cm}^3$  ( $n = 123$ ), Tabela 3.3 e 3.4; (b)  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$  ( $n = 161$ ), Tabela 3.5 e 3.6. Esta divisão em classes é baseada em Panshin; de Zeeuw (1970a), que consideram madeiras com densidade básica abaixo de  $0,36 \text{ g/cm}^3$  como leves, entre  $0,36$  e  $0,50 \text{ g/cm}^3$  como moderadamente pesadas, e maior que  $0,5 \text{ g/cm}^3$  como pesadas. Foram obtidos os coeficientes de Pearson ( $\rho$ ) para análise das relações entre as variáveis.

Tabela 3.1 - Estatística descritiva simples das variáveis observadas ( $n = 284$ )

Variável	Média	Desvio padrão	CV%	Mínimo	Máximo
Velocidade de onda (m/s)	645,13	84,12	13,04	398,47	830,50
Umidade (%)	78,29	55,44	70,81	28,08	396,44
Densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ )	0,53	0,16	30,19	0,20	0,84
Diâmetro (cm)	19,64	5,59	28,46	7,43	33,46
Fração madeira (%)	34,30	10,14	29,56	13,23	55,00
Fração água (%)	36,01	14,92	41,43	10,63	80,31
Fração gás (%)	29,69	16,26	54,77	2,61	71,29

Tabela 3.2 - Coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) das variáveis observadas ( $n = 284$ ), seguido da probabilidade do teste t para  $H_0: \rho = 0$

	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	Velocidade (m/s)	Umidade (%)	Diâmetro (cm)
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	1,00000	0,63896	-0,61958	0,20225
		<0,0001	<0,0001	0,0006
Velocidade (m/s)	0,63896	1,0000	-0,51112	0,49106
	<0,0001		<0,0001	<0,0001
Umidade (%)	-0,61958	-0,51112	1,0000	-0,00435
	<0,0001	<0,0001		0,9418
Diâmetro (cm)	0,20225	0,49106	-0,00435	1,000
	0,0006	<0,0001	0,9418	

<0,0001 – rejeita-se  $H_0$ , com valor de  $\rho \neq 0$  altamente significativo pelo teste t;

<0,0005 – rejeita-se  $H_0$ , com valor de  $\rho \neq 0$  significativo pelo teste t;

>0,0005 – não se rejeita  $H_0$ , pois valor de  $\rho \neq 0$  não é significativo pelo teste t.



Tabela 3.3 - Estatística descritiva simples das variáveis observadas para classe de densidade básica – DB (a):  $0,20 \leq DB \leq 0,50 \text{ g/cm}^3$  (n = 123)

Variável	Média	Desvio padrão	CV%	Mínimo	Máximo
Velocidade de onda (m/s)	602,00	88,65	14,73	398,47	774,05
Umidade (%)	110,90	68,83	62,06	30,53	396,44
Densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ )	0,38	0,09	23,68	0,20	0,50
Diâmetro médio (cm)	19,33	6,94	35,90	7,43	33,46
Fração madeira (%)	24,47	5,60	22,89	13,24	32,90
Fração água (%)	39,15	18,30	46,74	10,63	80,31
Fração gás (%)	36,38	18,47	50,77	3,40	71,29

Tabela 3.4 - Coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) das variáveis observadas para classe de densidade básica – DB (a):  $0,20 \leq DB \leq 0,50 \text{ g/cm}^3$  (n = 123), seguido da probabilidade do teste t para  $H_0: \rho = 0$

	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	Velocidade (m/s)	Umidade (%)	Diâmetro (cm)
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	1,00000	0,65462	-0,50242	0,20385
		<0,0001	<0,0001	0,0237
Velocidade (m/s)	0,65462	1,00000	-0,45992	0,48739
		<0,0001	<0,0001	<0,0001
Umidade (%)	-0,50242	-0,45992	1,00000	0,05099
		<0,0001	<0,0001	0,5754
Diâmetro (cm)	0,20385	0,48739	0,05099	1,00000
	0,0237	<0,0001	0,5754	

<0,0001 – rejeita-se  $H_0$ , com valor de  $\rho \neq 0$  altamente significativo pelo teste t;

<0,0005 – rejeita-se  $H_0$ , com valor de  $\rho \neq 0$  significativo pelo teste t;

>0,0005 – não se rejeita  $H_0$ , pois valor de  $\rho \neq 0$  não é significativo pelo teste t.

Tabela 3.5 - Estatística descritiva simples das variáveis observadas para classe de densidade básica – DB (b):  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$  (n = 161)

Variável	Média	Desvio padrão	CV%	Mínimo	Máximo
Velocidade de onda (m/s)	678,08	63,25	9,33	492,82	830,50
Umidade (%)	53,37	19,54	36,61	28,08	101,49
Densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ )	0,64	0,08	12,50	0,53	0,84
Diâmetro médio (cm)	19,87	4,28	21,49	9,70	28,79
Fração madeira (%)	41,80	5,21	12,54	34,76	54,95
Fração água (%)	33,62	11,17	33,22	14,93	57,92
Fração gás (%)	24,58	12,12	49,31	2,61	50,31

Tabela 3.6 - Coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) das variáveis observadas para classe de densidade básica (b):  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$  (n = 161), seguido da probabilidade do teste t para  $H_0: \rho = 0$

	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	Velocidade (m/s)	Umidade (%)	Diâmetro (cm)
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	1,00000	0,43008	-0,33469	0,45443
		<0,0001	<0,0001	<0,0001
Velocidade (m/s)	0,43008	1,00000	-0,13667	0,59656
		<0,0001	0,0839	<0,0001
Umidade (%)	-0,33469	-0,13667	1,00000	-0,08863
		<0,0001	0,0839	0,2635
Diâmetro (cm)	0,45443	0,59656	-0,08863	1,00000
		<0,0001	0,2635	

<0,0001 – rejeita-se  $H_0$ , com valor de  $\rho \neq 0$  altamente significativo pelo teste t;

<0,0005 – rejeita-se  $H_0$ , com valor de  $\rho \neq 0$  significativo pelo teste t;

>0,0005 – não se rejeita  $H_0$ , pois valor de  $\rho \neq 0$  não é significativo pelo teste t.

Os modelos estatísticos testados para estimativa da densidade básica incluíram apenas as variáveis independentes: velocidade de onda mecânica (m/s), que apresentou coeficiente de Pearson ( $\rho$ ) maior que zero com a densidade básica ( $\text{g/m}^3$ ), altamente significativo pelo teste t (probabilidade < 0,0001); diâmetro da amostra (cm), cujo coeficiente de Pearson ( $\rho$ ) foi maior

que zero com a velocidade de onda mecânica, altamente significativo pelo teste t, e também com a densidade básica - DB para a classe (b)  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$ .

A umidade apresentou boa correlação com a densidade básica da madeira, porém não foi incluída nos modelos. Sua obtenção exige o uso de equipamentos não testados nessa pesquisa e torna necessárias mais mensurações em campo.

### 3.2.5 Modelagem estatística

Foram testados os seguintes modelos estatísticos para todos os dados (equação única), e para os dados divididos em duas classes de densidade básica (DB) - (a)  $0,20 \leq DB < 0,50 \text{ g/cm}^3$  e (b)  $0,50 \leq DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$ :

1.  $DB_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot V_i + \varepsilon_i$
2.  $\ln DB_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1 / V_i) + \varepsilon_i$
3.  $\ln DB_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln V_i + \varepsilon_i$
4.  $\ln DB_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1 / V_i) + \beta_2 \cdot (D_i^2) + \varepsilon_i$
5.  $\ln DB_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln V_i + \beta_2 \cdot (D_i^2) + \varepsilon_i$

para  $i = 1, 2, \dots, 284$  – equação única

$i = 1, 2, \dots, 123$  – equação (a)

$i = 1, 2, \dots, 161$  – equação (b)

Onde:

$DB_i$  = densidade básica do disco ( $\text{g/cm}^3$ )

$V_i$  = velocidade de onda mecânica da imagem (m/s)

$D_i$  = diâmetro do disco ou da seção transversal (cm)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = coeficientes de regressão

$\ln$  = logaritmo natural ou neperiano

$\varepsilon_i$  = erro aleatório ou erro padrão residual

Para seleção do melhor modelo estatístico foram adotadas as seguintes medidas de acurácia: maior coeficiente de determinação -  $R^2$ ; menor erro médio percentual – EPM; menor erro padrão residual -  $\varepsilon_i$ .

### 3.3 Resultados e discussão

A densidade básica apresentou alto coeficiente de correlação de Pearson ( $\rho$ ) com a velocidade de onda mecânica, tanto para o conjunto de todos os dados ( $r = 0,63896$ ) quanto para a classe de menores densidades básicas (a) ( $r = 0,65462$ ) e de maiores (b) ( $r = 0,43880$ ). Assim, observa-se que quanto maior a densidade da madeira, maior a velocidade da onda mecânica, o que está de acordo com Carrasco e Azevedo Júnior (2003); RINNTECH (2005); Bucur (2006) e Pereira et al. (2007).

Também houve alta correlação entre densidade básica e umidade: para todo o conjunto de dados,  $r = -0,61958$ ; para classe (a),  $r = -0,50242$ ; e para classe (b),  $r = -0,33469$ . Quanto maior a fração água da amostra, menor a fração madeira, portanto menor a densidade básica.

Não houve correlação significativa entre densidade básica e diâmetro para toda a massa de dados ( $r = 0,20225$ ) e para a classe (a) ( $r = 0,20385$ ), porém foi altamente significativa para classe (b) ( $r = 0,45443$ ). A densidade da árvore diminui no sentido base – topo (PANSHIN; de ZEEUW, 1970b). Esta característica é expressiva apenas nas árvores analisadas de maior densidade.

Por outro lado, a velocidade de onda mecânica apresentou alta correlação com o diâmetro: para toda massa de dados ( $r = 0,49106$ ); para a classe (a) ( $r = 0,48739$ ); e para classe (b) ( $r = 0,59656$ ). A onda viaja por toda a seção transversal, há caminhos mais longos e mais curtos para sua passagem. Em seções transversais de maiores diâmetros, a onda terá mais opções de caminhos para percorrer. Alguns deles mais curtos, fazendo que a onda chegue rapidamente aos outros sensores. Em amostras de diâmetros menores, os caminhos têm menores distâncias e são menos abundantes, há menos oportunidades para existência de atalhos em comparação às amostras de maior diâmetro.

A velocidade da onda mecânica apresentou alta correlação com a umidade para o conjunto de todos os dados ( $r = -0,51112$ ) e para a classe (a) ( $r = -0,45992$ ). Para classe (b) a correlação entre elas não foi significativa ( $r = -0,13667$ ). Apesar de a umidade da madeira ser superior à USA (28%), seu decréscimo levou ao aumento da velocidade de onda mecânica, principalmente

para aquelas amostras com fração água maior. As amostras com maior fração madeira sofreram menores perdas de água, que não influenciaram a velocidade de onda mecânica.

Apesar da velocidade de onda mecânica ter sofrido influência do diâmetro (para toda massa de dados e para as duas classes) e da umidade da madeira (exceto para a classe (b) de densidades básicas), sua correlação altamente significativa com a densidade básica permite que se estabeleçam modelos estatísticos, onde a densidade básica seja a variável dependente e a velocidade de onda mecânica, a variável independente.

O diâmetro apresenta alta correlação com a velocidade de onda mecânica e pode entrar como outra variável independente do modelo, corrigindo a velocidade de onda mecânica.

### 3.3.1 Equações resultantes

As estimativas dos coeficientes de regressão ( $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ), o erro padrão residual –  $\varepsilon_i$ , o coeficiente de determinação –  $R^2$ , e o erro percentual médio - EPM dos 5 modelos testados, com suas variações para as duas classes de densidade básica - DB (a)  $0,20 \leq DB \leq 0,50 \text{ g/cm}^3$  e (b)  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$ , são apresentados na Tabela 3.7. Todos os modelos apresentaram boas medidas de acurácia de um modo geral, portanto podem ser utilizados para estimativa da densidade básica em árvores vivas.

Verifica-se que as medidas de acurácia das equações de regressão para os dados divididos em classes de densidade básica demonstraram melhor desempenho do modelo que aquelas encontradas para os dados agrupados, exceto o  $R^2$  das equações para a classe (b). Essa melhoria nas estatísticas é atribuída à redução da variância quando os dados coletados são agrupados em classes de densidade básica.

Na classe de densidade básica (b), o baixo valor de  $R^2$  significa que os pontos das coordenadas observadas estão bastante dispersos em relação à reta da equação, porém o erro médio percentual – EPM revela que a predição da densidade básica da equação para os dados da classe (b) foi mais eficaz que da equação para os dados agrupados.

Tabela 4.7 – Estimativas dos parâmetros de regressão ( $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ) e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica de árvores em pé

Modelo	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$\varepsilon_i$	$R^2$	EMP
1	- 0,23573	0,00118	-	0,01430	0,4083	21,2383
1(a)	- 0,00665	0,00063305	-	0,00424	0,4285	16,1868
1(b)	0,27176	0,00054240	-	0,00522	0,1850	8,8635
2	0,87394	-993,42286	-	0,05791	0,4879	20,2278
2(a)	0,15201	- 684,60574	-	0,03005	0,5415	14,8639
2(b)	0,03191	- 326,64454	-	0,01183	0,1640	8,6395
3	- 11,42805	1,66126	-	0,05964	0,4726	20,6536
3(a)	- 8,57374	1,18355	-	0,03212	0,5100	15,4440
3(b)	-3,81223	0,51544	-	0,01170	0,1734	8,6531
4	1,25843	- 1143,43539	- 0,00035376	0,05365	0,5273	19,2673
4(a)	0,38576	- 776,39114	- 0,00018424	0,02852	0,5686	14,0432
4(b)	- 0,32008	- 161,00977	0,00025531	0,01074	0,2459	8,3745
5	- 12,96332	1,92190	- 0,00035631	0,05536	0,5123	19,6720
5(a)	- 9,49352	1,33899	- 0,00017392	0,03081	0,5340	14,7693
5(b)	- 2,27846	0,26429	0,00024790	0,01070	0,2491	8,3546

$\varepsilon_i$  - erro aleatório

$R^2$  - coeficiente de determinação

EMP – erro percentual médio

No modelo 2, quando a variável resposta passa a ser o logaritmo neperiano da densidade básica e a independente o inverso da velocidade de onda, há o aumento significativo dos valores de  $R^2$  em relação aos das equações do modelo 1, expressando que a reta dessas equações se adéqua melhor à distribuição dos pontos das coordenadas observadas, exceto para a classe (b). Os valores de EMP diminuem um pouco.

Para o modelo 3, onde a variável resposta é o logaritmo neperiano da densidade básica e a variável independente é o logaritmo neperiano da velocidade de onda, o desempenho é menor em relação às equações do modelo 2, que é demonstrado pelos menores valores de  $R^2$  e maiores valores de EMP.

Os modelos 4 e 5 são variações dos modelos 2 e 3, respectivamente, por meio da inclusão da variável independente diâmetro. Houve melhora mais expressiva nos valores de  $R^2$  do que nos valores de EPM, principalmente para as equações da classe (b). Apesar da reta das equações se adequarem melhor à distribuição de pontos das coordenadas observadas, o EPM foi pouco afetado.

### 3.4 Conclusões

Os dados de velocidade de onda mecânica, obtidos por meio de tomografia de impulso, se mostraram úteis na construção de equações que estimem a densidade básica da madeira em árvores vivas.

Deve-se levar em conta que a densidade básica é um valor constante para a madeira, enquanto a velocidade de onda mecânica varia de acordo com a umidade. Quanto maiores os teores de água na madeira menor a velocidade de onda mecânica, sendo que acima do ponto de saturação das fibras – PSF, este efeito da umidade sobre a velocidade de onda é menor que abaixo do PSF (OLIVEIRA; SALES, 2005; OLIVEIRA et al., 2005; BUCUR, 2006).

O diâmetro da seção transversal também influencia na velocidade da onda mecânica, pois a onda possui mais opções de caminhos quando o diâmetro é maior, aumentando a possibilidade de haver atalhos por aonde a onda passe, chegando rapidamente aos outros sensores.

Apesar disso, as equações dos 5 modelos testados, tanto para os dados agrupados quanto divididos em classes de densidade básica – DB : (a)  $0,20 \leq DB \leq 0,50 \text{ g/cm}^3$  e (b)  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$ , apresentaram bons valores para suas medidas de acurácia.

As equações que apresentaram as melhores medidas de acurácia foram:

- Equação única:

$$\ln DB = 1,25843 - 1143,43539 \times (1/V) - 0,00035376 \times D^2;$$

- Classe (a)  $0,20 \leq DB \leq 0,50 \text{ g/cm}^3$ :

$$\ln DB = 0,38576 - 756,39114 \times (1/V) - 0,00018424 \times D^2;$$

- Classe (b)  $0,50 < DB < 0,85 \text{ g/cm}^3$ :

$$\ln DB = -2,27846 + 0,26429 \times \ln V - 0,00024790 \times D^2.$$

Onde:

V = velocidade de onda mecânica

D = diâmetro da seção transversal

## Referências

BUCUR, V. Environment modifiers of wood structural parameters detected with ultrasonic waves. In: \_\_\_\_\_. **Acoustics of wood**. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. chap. 9, p. 242-270.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

GARCIA, R. Acordo pós-Quito poderá ser alcançado só em 2010. **Ecosfera**, 06 nov. 2009. Disponível em: <<http://ecosfera.publico.clix.pt/noticia.aspx?id=1408628>> Acesso em: 12 nov. 2009.

GARTNER, B.L.; MOORE, J.R.; GARDINER, B.A. Gas in stems: abundance and potential consequences for tree biomechanics. **Tree Physiology**, Victoria, v. 24, n. 11, p. 1239-1250, 2004.

GUARINO, E.S.G.; MEDEIROS, M.B. de. **Levantamento da fitomassa dos estratos arbóreo e herbáceo-arbustivo da área de influência direta do aproveitamento hidrelétrico Corumbá IV (GO)**. Brasília: EMBRAPA Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2005. 20 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

HIGUCHI, N.; SANTOS, J. dos; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da Floresta Tropical Úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 28, n. 2, p. 153-166, 1998.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Agriculture, forestry and other land use. In: \_\_\_\_\_. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Iges, 2006. v. 4, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>> Acesso: 04 nov. 2009.

\_\_\_\_\_. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. **Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quarto Relatório do Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas**. 2007. 18 p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>> Acesso: 19 jul. 2007.

MOREIRA-BURGER, D.; DELITTI, W. B. C. Fitomassa epígea da mata ciliar do rio Mogi-guaçu, Itapira – SP. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 429-435, 1999.

NICOLOTTI, G.; SOCCO, L. V.; MARTINIS, R.; GODIO, A.; SAMBUELLI, L. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 19, n. 2, p. 66-78, Mar. 2003.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. 434 p.



OLIVEIRA, F.G.R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F.F.; SALGON, J.L.; SALES, A. Moisture content effect on ultrasonic velocity in *Goupia glabra*. **Materials Research**, Oxford, v. 8, n. 1, p. 11-14, 2005.

PANSHIN, A.J.; de ZEEUW, C. The physical nature of wood. In: \_\_\_\_\_. **Textbook of wood technology**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970a. chap. 6, p. 200-236.

\_\_\_\_\_. Variability of wood within a species. In: \_\_\_\_\_. **Textbook of wood technology**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970b. chap.7, p.237-275.

PICUS. **Picus home page**. Disponível em: < <http://www.picus-online.de/picus-online.de/picus/system/stomgrd.htm>> Acesso: 13 mar. 2009.

RINNTECH. **User Manual – Arbotom ® 3-D Tree Impulse Tomograph, version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP**. 2005. 42 p.

SANQUETTA, C.B.; BALBINOT, R. Metodologias para determinação da biomassa florestal. In: SANQUETTA, C.B.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. (Org.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR; ECOPLAN, 2004. p. 77-93.

SOARES, C.P.B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A.L.; LEITE, H.G. Modelos para estimar a biomassa da parte aérea em um povoamento de *Eucalyptus grandis* na região de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 179-189, 1996.

VEJA. Protocolo de Kioto. **Revista Veja**, São Paulo, abr., 2008. Perguntas e respostas. Disponível em: <[http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/perguntas\\_respostas/protocolo\\_kioto/Index.shtml](http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/perguntas_respostas/protocolo_kioto/Index.shtml)> Acesso em: 12 nov. 2009.

WANG, X.; ALLISON, B. Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 34, n. 1, p. 1-4, 2008.