



Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos

Edilene Silva RIBEIRO^{1*}, Joaquim Carlos GONÇALEZ²,
Roberta Santos SOUZA², Marcella Hemida PAULA²

¹ Departamento de Agronomia, Instituto Federal de Mato Grosso, Campo Novo do Parecis, Mato Grosso, Brasil.

² Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

* E-mail: edilene.ribeiro@cnp.ifmt.edu.br

Recebido em outubro/2015; Aceito em março/2016.

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo estimar os módulos de elasticidade dinâmico (MOEd), módulos de elasticidade estático (MOE) e de ruptura (MOR) da madeira *Qualea brevipedicellata* Stafleu e *Erismia uncinatum* Warm, obtidos por ensaios destrutivos norma COPANT e por meio de ensaios não destrutivos com ultrassom e *Stress Wave*. Foram confeccionados 20 corpos de prova por espécie nas dimensões 2 x 2 x 30cm, totalizando 40 corpos de prova. Foram realizados os ensaios convencionais norma COPANT 30:1 - 006/72 e ensaios não destrutivos através do *Stress Wave* e Ultrassom. Foram realizadas análises descritivas e correlações entre as variáveis. Os métodos de ondas de tensão e ondas ultrasonoras mostram-se eficiente e uma importante ferramenta para a inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade da madeira. Os valores dos coeficientes de variação estão relativamente mais baixos no Modulo de elasticidade dinâmico (MOEd) em relação ao modulo de elasticidade estático (MOE).

Palavras-chave: *Stress Wave*, Ultrassom, flexão estática.

Evaluation of mechanical properties of wood for destructive and non-destructive methods

ABSTRACT: This study aims to estimate the modules elasticity dynamic (MOEd), static modulus of elasticity (MOE) and rupture (MOR) of wood *Qualea brevipedicellata* Stafleu and *Erismia uncinatum* Warm obtained by destructive testing and through non-destructive testing with ultrasonic waves and Stress Wave. 20 sample were made up by species dimensions 2 x 2 x 30 cm, totaling 40 specimens. Were done conventional testing standard COPANT 30: 1 - 006/72 and non-destructive tests by Stress Wave and Ultrasound. Descriptive statistics and correlations between variables were performed. Ultrasonic waves they showed up efficient and an important tool for non-destructive inference the modulus of elasticity of the wood. The values of coefficients of variation are relatively lower in dynamic modulus of elasticity (MOEd) relative to the module static elasticity (MOE).

Keywords: Stress Wave, Ultrasonic waves, static bending.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, a caracterização das propriedades mecânicas da madeira é feita por meio da avaliação destrutiva dos corpos de prova, o que pode ocasionar a variabilidade dos resultados devido a problemas na confecção do corpo de prova ou fatores como uma amostragem inadequada (OLIVEIRA, 2003). Uma caracterização da madeira por meio de métodos não destrutivos é possível e eficiente, onde não há a necessidade de extração de corpos de prova, uma vez que a avaliação é feita na própria árvore, peça ou estrutura. De acordo com Ross et al. (1998), a avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar as suas capacidades de uso final. Carreira; Candian, (2008) citam diversas técnicas

de ensaios não destrutivos aplicáveis à madeira, como a classificação visual, o ultrassom, a vibração transversal e da vibração longitudinal.

O presente trabalho tem como objetivo estimar os módulos de elasticidade dinâmico (MOEd) módulos de elasticidade estático (MOE) e de ruptura (MOR) da madeira *Qualea brevipedicellata* Stafleu (cambará) e *Erismia uncinatum* Warm (cedrinho) obtidos por ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e coleta do material

Esta pesquisa foi desenvolvida no laboratório de tecnologia da madeira do departamento de Engenharia Florestal na Universidade de Brasília. As pranchas de *Qualea brevipedicellata*

e *Erismia uncinatum* foram obtidas nos galpões do Instituto de Metrologia e Qualidade do Estado de Mato Grosso (Imeq/MT), no distrito industrial de Cuiabá. Deste material foram confeccionados 20 corpos de prova para cada nas dimensões 2 x 2 x 30 cm. Os ensaios convencionais (flexão estática) e não destrutivos (*Stress Wave* e ultrassom) foram realizados no Laboratório de tecnologia da madeira EFL/UnB. Os ensaios convencionais foram realizados conforme COPANT 30:1 - 006/72 (Figura 1).



Figura 1. Máquina universal de ensaio EMIC DL 30kM, utilizada no ensaio de flexão estática.

2.3. Ensaios não destrutivos

2.3.1. *Stress wave*

Para a realização do ensaio de stress wave foi utilizado o aparelho *Stress Wave Timer* modelo 239A (Metriguard Inc.), que mede o tempo de propagação de onda de tensão ao longo do corpo de prova, por meio de dois transdutores com acelerômetros, sendo um emissor na forma de pêndulo e outro um receptor de forma plana e um relógio registrador da velocidade da onda (Figura 2).

A princípio, para cada amostra com 30 cm (2 x 2 x 30 cm) foram mensurados o comprimento (cm) a Largura (cm) e a espessura (cm) para a determinação do Volume (cm³) com um paquímetro digital e em seguida a massa (g) de cada corpo de prova em balança digital, modelo Marconi AS 2000, com precisão de 0,01 g. Os corpos de prova foram fixados no aparelho através de braçadeiras de alavanca. O pendulo preso na braçadeira inicial, induziu a onda de tensão que atravessou

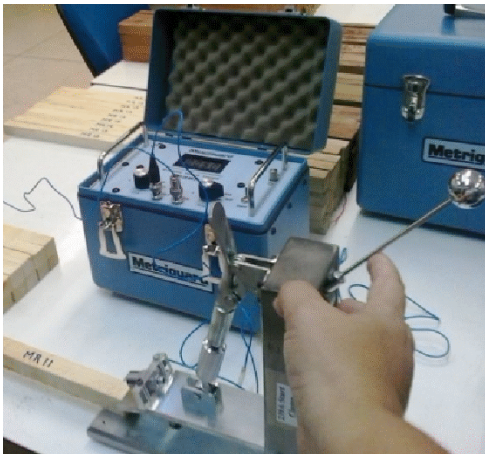


Figura 2. *Stress Wave Timer* modelo 239A (Metriguard Inc.).

todo corpo de prova até alcançar o outro acelerômetro. Foram efetuadas em cada amostra três leituras do tempo de propagação da onda obtendo-se um valor médio para o tempo (CALDERON, 2012). Foram ensaiados 40 corpos-de-prova das 2 espécies estudadas sendo que em cada amostra ocorreram três repetições. Na determinação da velocidade foi utilizada a Equação 1:

$$V = \frac{L}{t \times 10^{-6}} \quad (1)$$

em que: V = velocidade de propagação da onda de tensão (m/s); L = distância percorrida pela onda de tensão (m); t = tempo de trânsito da onda de tensão (μs).

Na norma COPANT 555 o vão utilizado é de 28cm de comprimento para flexão estática, para este ensaio de módulo de elasticidade dinâmico MOEDs foi utilizado o mesmo vão. Já o tempo utilizado para o cálculo foi a média obtida nas três leituras do aparelho. O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido pela Equação 2:

$$MOEDs = V^2 D_{12\%} \frac{1}{g} \quad (2)$$

em que: MOEDs = módulo de elasticidade dinâmico (N/mm²); V = velocidade de propagação da onda de tensão (m/s); D_{12%} = densidade a 12% de umidade (kg/m³); e g = aceleração da gravidade (9,804 m/s²).

2.3.2. *Ultrassom*

Para o ensaio de ultrassom foram utilizados os mesmos corpos de prova usados nos ensaios de ondas de tensão e flexão estática, ou seja, 20 corpos-de-prova de cada espécie com teor de umidade de 12%. O equipamento utilizado foi USLab com potência de 700 V, resolução de 0,1 μs e transdutores de onda longitudinal e de seção plana que operam na frequência de 45 kHz de acordo com a Figura 3. O aparelho determina as propriedades elásticas da amostra através da medição do tempo de propagação da onda ultrassônica para determinar a velocidade. Após a calibração do equipamento e já tendo os volumes (cm³) de cada corpo-de-prova cada um dos transdutores recebe um gel auxiliando a aderência nas extremidades da amostra (CALDERON, 2012).

Através do método estereométrico, realizando medições nas faces radial, tangencial e longitudinal e obtendo a massa de cada corpo de prova foi possível calcular a densidade aparente do material. Equação aplicada 3. Para a determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEdu) utilizou-se a seguinte Equação 4.

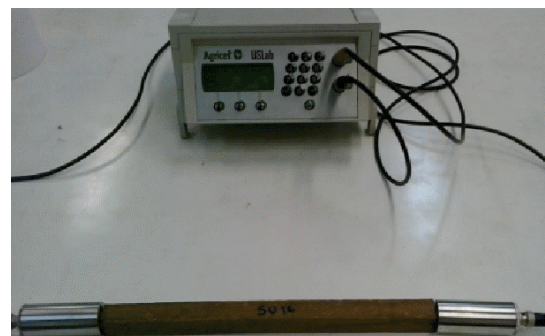


Figura 3. Ultrassom USLab.

$$D_{12\%} = \frac{P}{Vol} \quad (3)$$

$$MOE_{du} = D_{12\%} \times Vel^2 \quad (4)$$

em que: $D_{12\%}$ = densidade da amostra a 12% de umidade (g/cm^3); P = massa da amostra a 12% de umidade (g); Vol = volume da amostra (cm^3); MOE_{du} = Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa); $D_{12\%}$ = densidade da madeira a 12% de umidade (kg/m^3); Vel = velocidade da onda ultrassônica (m/s).

2.4. Análise estatística

Para a caracterização tecnológica foi utilizada a estatística descritiva: máximo, mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação. Também foi realizada correlação de Pearson para avaliar a correspondência entre as variáveis. O programa estatístico Genes da UFV foi utilizado na análise dos dados (CRUZ, 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verifica-se que a velocidade obtida através do ultrassom para as espécies em estudo possui valores semelhantes com os citados na literatura entre 3000 e 6000 m/s^{-1} (GONÇALEZ et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002; STANGERLIN et al., 2010; CALDERON, 2012).

Tabela 1. Valores médios da velocidade, Módulo de Elasticidade Dinâmico, Módulo de Elasticidade Estático e Módulo de Ruptura, obtidos através *Stress Wave*, Ultrassom e Flexão estática para as madeiras estudadas.

	Stress wave			
	VEL (m/s)	MOEds (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
<i>Qualea brevipedicellata</i>				
Média	4326.52	13500.96	12808.06	84.86
Mínimo	4054.05	11863.43	10899.57	46.07
Máximo	4615.38	15631.54	15259.4	111.53
DP	190.59	1208.02	1124.95	16.59
CV	4.41	8.65	8.78	19.55
<i>Erismia uncinatum</i>				
Média	4527.87	16756.02	8103.68	68.9
Mínimo	4245.28	14151.89	5722.28	47.1
Máximo	4864.86	21488.91	11582.09	85.08
DP	141.25	2067.79	1319.17	10.46
CV	3.12	12.34	16.28	15.18
Ultrassom				
	VEL (m/s)	MOE _{du} (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
<i>Qualea brevipedicellata</i>				
Média	5465.86	21532.24	12808.06	84.86
Mínimo	5145.8	18763.01	10899.57	46.07
Máximo	5813.95	24359.48	15259.4	111.53
DP	183.46	1490.22	1124.95	16.59
CV (%)	3.36	6.92	8.78	19.55
<i>Erismia uncinatum</i>				
Média	4907.86	19678.33	8103.68	68.9
Mínimo	4680.19	16513.82	5722.28	47.1
Máximo	5067.57	23505.12	11582.09	85.08
DP	98.51	2225.79	1319.17	10.46
CV (%)	2.01	11.31	16.28	15.18

VEL = Velocidade de propagação de onda, MOEds = Constante elástica dinâmica Stress Wave, MOE_{du} = Constante elástica dinâmica Ultrassom, MOE = Módulo de elasticidade, MOR = Módulo de ruptura, DP = Desvio padrão e CV = Coeficiente de variação.

Os valores do MOEd dinâmico Ultrassom e *Stress wave* para as duas espécies em estudo foi mais alto que o MOE estático (Norma COPANT). A superioridade do MOEd em relação ao MOE pode ser explicada pela natureza viscoelástica da madeira. Segundo Goncalvez (2001), quanto menor a frequência de excitação do material, maior seria a proximidade entre os resultados obtidos em ensaios dinâmicos e seus correspondentes estáticos.

As relações entre os módulos dinâmicos ultrassom e estáticos estão compreendidos entre 1,6 cambará (*Qualea brevipedicellata*) e 2,4 cedrinho (*Erismia uncinatum*). Já as relações entre módulos dinâmicos *Stress wave* e estáticos estão entre 1,05 para cambará (*Qualea brevipedicellata*) e 2,06 cedrinho (*Erismia uncinatum*). Gonzalez et al. (2001); D'Ambros (2011) Em seus trabalhos encontraram resultados semelhantes para espécies tropicais Amazônicas. O coeficiente de variação do MOEd dinâmico tanto do *Stress wave* como do Ultrassom para as duas espécies foi menor neste ensaio do que os coeficientes de variação do MOE (flexão estática), mostrando menor variabilidade do método não destrutivo para ao destrutivo. Corroborando com os resultados Miná (2004) encontrou coeficientes de variação na madeira de eucalipto menores nos ensaios não destrutivos em relação ao destrutivo.

3.1. Stress wave

A correlação de Person estabelecida entre ensaio de *Stress wave* e Flexão estática é apresentada na tabela 2. Esta análise evidencia uma forte correlação entre a velocidade de propagação de onda (VEL) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEds), e também entre velocidade de propagação de onda (VEL) e módulo de elasticidade estático (MOE). Estas variáveis estão correlacionadas entre si, apresentando valores significativos à 1 e 5% de probabilidade pelo teste t.

Melo et al. (2013) avaliando as mesmas propriedades mecânicas em lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke), encontraram forte correlação entre a velocidades de propagação de ondas com o módulo de elasticidade dinâmica, assim como o modulo de elasticidade dinâmico e modulo de elasticidade, determinando desta forma que propagação de ondas de tensão afetam muito mais o MOEds, para ambas as espécies. Del Menezzi et al. (2010) analisando por meio de ondas de tensão as propriedades mecânicas de 6 espécies amazônicas apresentaram correlação entre a velocidade e o módulo de elasticidade dinâmico e o modulo de elasticidade estático ao nível de 1% de significância. Iwakiri et al. (2013) estimando o módulo de elasticidade dinâmico de *Tectona*

Tabela 2. Correlação de Pearson entre *Stress wave* e Flexão estática para as madeiras estudadas.

Espécie		VEL	MOEds	MOE	MOR
		VEL	1		
<i>Qualea brevipedicellata</i>	MOEds	0.966**	1		
	MOE	0.5022*	0.3864 ns	1	
	MOR	0.126 ns	0.1177 ns	0.151 ns	1
<i>Erismia uncinatum</i>	VEL	1			
	MOEds	0.6909**	1		
	MOE	0.4503*	0.1562 ns	1	
	MOR	0.0198 ns	-0.05 ns	0.3204 ns	1

VEL = velocidade de propagação da onda ultrassonora, $m.s^{-1}$; MOEds = constante elástica dinâmica *Stress Wave*, MPa. MOE = módulo de elasticidade, MPa; MOR= módulo de ruptura, Mpa. * = significativo ao nível de 5%; ** = significativo ao nível de 1%; ns = não significativo.

grandis, utilizando os métodos de ondas acústicas encontrou forte correlação entre a Vel X MOEds de 0,8389.

3.2. Ultrassom

A correlação de Person estabelecida entre ensaio de Ultrassom e Flexão estática é apresentada na tabela 3. Esta análise evidencia uma forte correlação entre a velocidade de propagação de onda (VEL) e o módulo de elasticidade dinâmico (MOEdu) para as duas espécies em estudo. Estas variáveis estão correlacionadas entre si, apresentando valores significativos à 1 e 5% de probabilidade pelo teste t.

A análise evidencia que apenas as variáveis velocidade e o MOEdu e MOE estão correlacionadas entre si para a espécie *Qualea brevipedicellata*, enquanto para a *Erisma uncinatum* a correlação ocorreu apenas para a Vel e o MOEdu. Vivian et al. (2012) estimando os módulos de elasticidade e ruptura da madeira de *Eucalyptus cloeziana* por métodos não destrutivos encontraram correlação entre a velocidade de propagação de ondas e MOE e MOR diferindo do presente trabalho. Segundo Macdonald et al. (1990) relacionar MOR e elasticidade dinâmica se torna difícil, pois a presença de defeitos e a inclinação das fibras tem efeito mais significativo no MOR do que na velocidade longitudinal da onda ultrassônica. Calderon (2012) caracterizando quatro espécies amazônicas com ultrassom encontrou correlação entre a VEL e MOEdu *A. macrocapon*, para a espécie *S. globulifera* a correlação ocorreu entre Vel e MOEdu (0,9724), para *O. costulata* ocorreram Vel x MOEdu (0,8919), Vel x MOE (0,8536).

Tabela 3. Correlação de Pearson entre Ultrassom e Flexão estática para as madeiras estudadas.

Espécie	VEL	MOEds	MOE	MOR
<i>Qualea brevipedicellata</i>	VEL	1		
	MOEdu	0.9419**	1	
	MOE	0.5485*	0.3917 ns	1
	MOR	-0.0168 ns	-0.0268 ns	0.151 ns
<i>Erisma uncinatum</i>	VEL	1		
	MOEdu	0.6727**	1	
	MOE	0.4118 ns	0.0709 ns	1
	MOR	0.0787 ns	-0.0393 ns	0.3204 ns

VEL = velocidade de propagação da onda ultrassônica, m.s⁻¹; MOEdu = constante elástica dinâmica Ultrassom, MPa. MOE = módulo de elasticidade, MPa; MOR = módulo de ruptura, Mpa. * = significativo ao nível de 5%; ** = significativo ao nível de 1%; ns = não significativo.

4. CONCLUSÕES

Os métodos de ondas de tensão e ondas ultrasonoras mostram-se eficientes e um importante instrumento para a inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade da madeira de florestas nativas.

Os valores dos coeficientes de variação estão satisfatórios e são relativamente mais baixos no Módulo de elasticidade dinâmico MOEds e MOEdu em relação ao módulo de elasticidade estático MOE, ou seja menor variabilidade dos métodos não-destrutivos em comparação com os destrutivos.

5. REFERÊNCIAS

CALDERON, C. M. A. **O segmento moveleiro na região do Alto Juruá – AC: Perfil e uso de tecnologias alternativas para a caracterização das principais espécies madeireiras.** 2012.158p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

- CARREIRA, M. R.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. **Semina: Ciências Exatas e da Terra**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 3-14, Londrina, 2008.
- CRUZ, C. D. **Programa Genes: Biometria.** Editora UFV. Viçosa, 2006. 382p.
- D'AMBROS, J. **Cadeia produtiva moveleira da região central do Estado do Tocantins: caracterização e perspectivas para a formação de um pólo moveleiro.** 287f. 2011. Tese (Doutorado Ciências Florestais), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília-DF. 2011.
- DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Revista Acta Amazônica**, Manaus, v. 40, n. 2, p. 325-332, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672010000200011>
- GONÇALEZ, J. C.; VALLE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas de ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001.
- IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G.; ROCHA, V. Y.; IWAKIRI, V. T. Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco das árvores de *Tectona grandis* utilizando método de ondas acústicas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 523-532, 2013.
- MCDONALD, K. A.; FALK, R. H.; PATTON-MALLORY, M. **Nondestructive testing of wood products and structures: state of the art and research needs.** Madison, USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, p.137-147, 1990.
- MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R.; STANGERLIN, D. M. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 2, p. 238-249. 2013.
- MINÁ, A. J. S.; OLIVEIRA, F. G. R.; CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A.; SALES, A. Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultrassom. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 1, n. 65, p. 188-189, 2004.
- OLIVEIRA, F. G. R.; CAMPOS, J. A. O.; SALES, A. Ultrasonic measurements in Brazilian hardwood. **Materials Research**, São Carlos, v. 5, n. 1, p. 51-55, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392002000100009>
- OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIAN, M.; LUCCHETTE, F. F.; CALIL JÚNIOR, C.; SALES, A. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som. In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Pan American Conference for Nondestructive Testing, 2003. 5p.
- ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 14-19, 1998.
- ROSS, R. J. Using sound to evaluate standing timber: review. **Forest Products Journal**, Madison, v. 49, p. 43-44, 1999.
- STANGERLIN, D. M.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. DE; CALEGARI, L.; VIVIAN, M. A.; CASTELO, P. A. R.; BELTRAME, R. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 44-53, 2010. <http://dx.doi.org/10.12953/2177-6830.v01n02a04>
- VIVIAN, M. A.; MODES, K. S.; SANTINI, E. J.; CARVALHO, D. E.; MORAES, W. W. C.; SOUZA, J. T.; GATTO, D. A. Estimativa dos módulos de elasticidade e ruptura da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell por meio de método não destrutivo. ISSN: 2177-6830 **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 3, n. 2, p. 91-101, 2012.
- VIVIAN, M. A.; SANTINI, E. J.; MODES, K. S.; CARVALHO, D. E.; MORAES, W. W. C.; SOUZA, J. T.; SUSIN, F. Estimativa da resistência e rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* por meio de onda ultrassônica. **PBF – Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 109-113, 2012.