

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

**Comparação de métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé  
visando à determinação da biomassa**

**Marcos Felipe Nicoletti**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba**

**2011**

**Marcos Felipe Nicoletti**

**Engenheiro Florestal**

**Comparação de métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à  
determinação da biomassa**

Orientador:

Prof. Dr. **JOÃO LUIS FERREIRA BATISTA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba**

**2011**

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

Nicoletti, Marcos Felipe

Comparação de métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa / Marcos Felipe Nicoletti. - - Piracicaba, 2011.  
83 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Amostragem 2. Árvores florestais 3. Biomassa - Determinação 4. Dendrometria  
5. Erros de medição 6. Florestas I. Título

CDD 634.9285  
N643c

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

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo amor, dedicação, compreensão, aprendizado, incentivo e todo carinho demonstrado a mim e minha irmã. Sou eternamente grato por sermos esta família muito feliz!

Ao professor Dr. João L. F. Batista, pela orientação e todos os ensinamentos adquiridos durante esta etapa.

À CAPES pela bolsa concedida.

À todos os colegas do Centro de Métodos Quantitativos, Eduardo, Jaime, Edgar, Tito, Andréa, Sabrina, Mauro, Roberto e demais, por toda compreensão, aprendizado e amizade. Em especial, aos meus queridos amigos, Juliana, Sâmia, Camilinha, Isadora e Samuel pelas palavras amigas nas horas que mais precisamos. Já sinto saudades das nossas jantares, da hora do café e das risadas deste tempo em que estivemos em Piracicaba.

Ao Jeferson, pela ajuda indispensável fornecida e excelente profissional que considero.

Ao casal mais que especial, Tia Maristela e Tio Luiz Antonio Bonella, por demonstrarem serem pessoas extraordinárias com um coração gigante.

À Renata, por ter sido minha amável companheira e me proporcionado uns dos melhores momentos de minha vida.

Aos meus colegas de trabalho e amigos, professora Bruna Muller e professor André Hess, pelo apoio e incentivo fornecido nesse início de jornada profissional.

A Deus, o grande criador e responsável por todos os desafios que enfrentamos nesta vida terrena.



“Tudo na vida tem razão de ser. Diante dos sofrimentos,  
sejamos fortes e confiantes, assim, teremos lições  
que sabiamente nos alertam para a correção  
e nos impulsionam para o progresso.”

“Vera L. M. Carvalho”



## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| RESUMO.....   | 11 |
| ABSTRACT .....  | 13 |
| 1 INTRODUÇÃO GERAL .....  | 15 |
| 1.1 Objetivo geral.....   | 17 |
| 1.2 Objetivos específicos.....  | 17 |
| Referências .....   | 17 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....  | 19 |
| 2.1 Antecedentes: Métodos de Medição da Biomassa .....                                  | 19 |
| 2.2 Métodos de Medição do Volume da Madeira .....                                       | 19 |
| 2.3 Medição do Tronco de Árvores e Cubagem Rigorosa.....                                | 21 |
| 2.4 Dendrômetros Ópticos e Cubagem Rigorosa Não-Destrutiva .....                        | 24 |
| Referências .....   | 27 |
| 3 EXATIDÃO DE DENDRÔMETROS ÓPTICOS PARA DETERMINAÇÃO DO VOLUME<br>DE ÁRVORES EM PÉ..... | 31 |
| Resumo .....  | 31 |
| Abstract .....  | 31 |
| 3.1 Introdução.....   | 32 |
| 3.2 Material e Métodos .....  | 33 |
| 3.2.1 Área de estudo.....   | 34 |
| 3.2.2 Descrição dos dendrômetros .....  | 34 |
| 3.2.3 Coleta de dados .....   | 35 |
| 3.2.4 Volume parcial por seção ao longo do fuste e total .....                          | 36 |
| 3.2.5 Cálculo dos erros individuais .....   | 37 |
| 3.2.6 Erro no volume da parcela.....  | 38 |
| 3.2.7 Análise dos dados .....   | 38 |



|   |    |
|---|----|
| 3.3 Resultados e Discussão .....  | 39 |
| 3.3.1 Análise dos erros do diâmetro ao longo do tronco .....  | 39 |
| 3.3.2 Erros no Volume por Seção e Acumulado .....   | 44 |
| 3.3.3 Erro do Volume da Árvore.....   | 50 |
| 3.3.4 Erro no volume da parcela .....   | 55 |
| 3.4 Resumo dos resultados .....   | 57 |
| 3.5 Conclusão.....  | 58 |
| Referências .....   | 58 |
| 4 DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL POR UMA METODOLOGIA NÃO-<br>DESTRUTIVA através de DENDRÔMETROS ÓPTICOS ..... | 61 |
| Resumo .....  | 61 |
| Abstract.....   | 61 |
| 4.1 Introdução.....   | 62 |
| 4.2 Material e Métodos .....  | 64 |
| 4.2.1 Área de estudo .....  | 64 |
| 4.2.2 Descrição dos dendrômetros .....  | 65 |
| 4.2.3 Cubagem rigorosa .....  | 66 |
| 4.2.4 Volume das árvores .....  | 66 |
| 4.2.5 Discos de madeira amostrados do tronco.....   | 67 |
| 4.2.6 Determinação do teor de umidade .....   | 67 |
| 4.2.7 Determinação da biomassa.....   | 68 |
| 4.2.8 Modelos de predição de biomassa do tronco sob a técnica gravimétrica .....                                  | 68 |
| 4.2.9 Modelos de predição de biomassa do tronco sob a técnica volumétrica.....                                    | 69 |
| 4.2.10 Ajuste e Avaliação dos modelos de predição .....   | 69 |
| 4.3 Resultados e Discussão .....  | 72 |
| 4.3.1 Análise descritiva das variáveis utilizadas para a predição .....   | 72 |

|   |    |
|---|----|
| 4.3.2 Critérios de seleção dos modelos ajustados por meio da técnica gravimétrica ..... | 73 |
| 4.3.3 Critérios de seleção dos modelos ajustados através da técnica volumétrica .....   | 74 |
| 4.3.4 Modelos selecionados para análise dos erros de predição .....                     | 75 |
| 4.3.5 Erros de predição com os diversos métodos de ajuste.....                          | 76 |
| 4.4 Conclusão .....   | 79 |
| Referências .....   | 79 |
| ANEXOS .....  | 81 |



## RESUMO

### **Comparação de métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa**

As florestas são vistas como excelentes acumuladoras de biomassa e carbono da atmosfera, contribuindo para a redução do efeito estufa. Para ter conhecimento da biomassa acumulada nas árvores é necessário realizar determinadas técnicas para levantar o volume de madeira dos povoamentos. Desta forma, objetiva-se neste trabalho estudar a qualidade das medidas de cubagem da árvore em pé através de dendrômetros ópticos de medição do tronco visando à determinação da biomassa de árvores sem amostragem destrutiva. O trabalho foi desenvolvido na Estação Experimental de Itatinga/SP que pertence a Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). Foram amostradas 175 árvores em três parcelas de *Eucalyptus grandis*. O diâmetro do fuste das árvores em pé foi mensurado com os dendrômetros (Criterion 400 e RC3H) em distâncias de 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 2,0 m e a partir deste de metro em metro ao longo do tronco até os 8 m de altura. Após a cubagem em pé foi derrubada a árvore e seccionada para pesagem do tronco, sendo que o diâmetro foi obtido com auxílio de suta e da trena nas mesmas posições em que se realizou a cubagem não destrutiva. De posse dos diâmetros foram calculados o volume por secção e por árvore individual através da fórmula de Smalian para posterior comparação dos métodos. Depois de seccionado o tronco, discos de 5 cm de espessura foram retirados à 0, DAP, 50 e 100% da altura total, pesados e secos, para determinação da umidade. Foi feito o ajuste de vários modelos empíricos para a predição da biomassa tanto para a técnica gravimétrica e para a volumétrica. Para os erros das medidas dos diâmetros obtidos de forma não destrutiva os dois dendrômetros forneceram medidas subestimadas de modo geral. O Criterion foi o que resultou nas melhores estimativas (10%) e o RC3H (30%) em relação a cubagem convencional. Com os modelos selecionados para a predição da biomassa verificou um erro relativo médio subestimado de 11% com o Criterion e 40% para o RC3H. Portanto, a utilização destes dendrômetros em levantamentos não destrutivos deve ser criteriosa quando se deseja estimativas com grande confiabilidade, fator este, que pode restringir muitas vezes seu emprego.

Palavras-chave: Erros de medição; Amostragem não destrutiva, Criterion 400; RC3H



## ABSTRACT

### **Comparison of non-destructive methods of wood volume determination of standing trees for biomass determination**

The forests are seen as a great atmospheric carbon and biomass pools, contributing for the reduction of the greenhouse effect. The quantification of the tree pool biomass is based on mensurational techniques that determine the individual stand tree volume. The objective of this project was to study the measurement quality of determination of the volume of standing trees by optical dendrometers for stem measure, aiming the biomass determination without destructive sampling. This study was developed at the Experimental Station of Forest Sciences, in Itatinga / SP, which belongs to the University of São Paulo (ESALQ / USP). Were sampled in total 175 trees in three of *Eucalyptus grandis*. The stem diameter of standing trees was measured with the dendrometers (Criterion and RC3H) at distances of 0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 2.0 meters from this point meter by meter along the stem up to 8 meters height. After the cubing standing trees they were felled and sectioned for weighing the stem, the diameter obtained with a caliper and a tape in the same positions in which the non-destructive measures were taken. With the diameters the volume were calculated by section and by individual tree by the Smalian formula for comparison of methods. After sectioned the stem wood disks with approximately 5 cm of thickness at the positions 0, DBH, 50 and 100% of the total height were removed and dried for determination of humidity. Was adjusted several empirical models for prediction of biomass for gravimetric and volumetric technique. For the errors in diameter measurements obtained from the non-destructively way the two dendrometers provided generally underestimated measures. The Criterion was the one that resulted in the best estimates (10%) and RC3H (30%) compared to conventional scaling. With selected models for the prediction of biomass found a mean relative underestimated error of 11% with the Criterion and 40% for RC3H. Therefore, the use of dendrometers in non-destructive surveys should be careful when you want to estimate with great confidence, a factor which can often restrict their use.

Keywords: Measurement errors; Nondestructive sampling; Criterion 400; RC3H



## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas são consideradas as maiores acumuladoras de biomassa do planeta, e a mídia vêm demandando dos profissionais que atuam na área florestal a geração de informações e conhecimentos que possam auxiliar na redução dos riscos ambientais. O termo biomassa florestal significa toda a biomassa, matéria de origem biológica viva ou morta, existente na floresta ou apenas na sua fração arbórea (SANQUETTA, 2002).

Os estudos de biomassa florestal são feitos com objetivos diversos, dentre os quais se destacam a quantificação da ciclagem de nutrientes, a quantificação para fins energéticos e como base de informação para estudos de sequestro de carbono. Esses estudos são de grande importância para a tomada de decisões no manejo dos recursos florestais (PÁSCOA et al., 2004). O interesse na completa utilização da árvore (raízes, tronco, ramos), o uso dos resíduos da manufatura de produtos florestais, a quantificação de material combustível em relação ao potencial de incêndio de uma floresta e outras abordagens aumentam a importância dos estudos de biomassa (HUSCH; MILLER; BEERS, 1982; PHILIP, 1994).

Os inventários florestais têm sido usados como ponto de partida para estimar a biomassa aérea nas florestas tropicais no Brasil (BROWN; GILLESPIE; LUPO, 1989). A quantificação de biomassa florestal, conforme Salati (1994), divide-se em métodos diretos, aqueles aplicados para áreas de pequenas extensões, divididos entre as técnicas gravimétricas e volumétricas, e os indiretos, geralmente utilizados para grandes áreas.

Os métodos diretos de amostragem de biomassa podem ser enquadrados no método da árvore individual ou método de parcela (SANQUETTA, 2002). O primeiro método é feito mediante a seleção de uma árvore média do povoamento. Sendo que, para se conhecer essa árvore, é preciso realizar um inventário florestal piloto e calcular o diâmetro ou a área seccional média dessa árvore. Pode-se também, conhecer a distribuição diamétrica da floresta, derrubando um determinado número de árvores para cada amplitude diamétrica, abrangendo todas as classes existentes na floresta. Após a definição dessa árvore, procede-se a derrubada e a determinação de biomassa de um número de indivíduos, que se constituem na amostra. Em seguida, segundo Higuchi e Carvalho Jr (1994) são obtidos separadamente em campo os pesos verdes para o tronco, galhos, folhas e serragens produzidas pela divisão do tronco e galhos. Logo, devem-se retirar discos de aproximadamente 3 cm de espessura do tronco e dos galhos em alturas relativas ao comprimento total e um disco na altura do DAP. Todas as amostras do tronco, galhos grossos,



galhos finos, folhas e discos devem ser colocadas em estufa até estabilizarem-se em peso, para a obtenção do peso seco, caracterizando a técnica gravimétrica. O método da parcela consiste basicamente o mesmo procedimento, só que é determinado uma área amostral e assim, estimado a biomassa desses indivíduos.

Já a técnica volumétrica, segundo Sanquetta (2002), consiste em determinar o volume da árvore por um processo de cubagem rigorosa, coletando-se discos de madeira para determinação da densidade básica média da árvore e posterior conversão do seu volume em biomassa. O uso dessa metodologia, apesar da simplicidade pode, segundo Fearnside (1997) e Nogueira et al. (2007), levar a estimativas muito discrepantes. Essa discrepância se deve aos erros associados à obtenção das variáveis dendrométricas e ao erro associado à aplicação da densidade básica em nível de espécie.

Os métodos indiretos podem ser por meio da construção de equações de predição da biomassa obtidas a partir da mensuração de árvores individuais, onde as variáveis dendrométricas, como diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total ou comercial, são medidas e associadas à biomassa aérea, através de técnicas de regressão (ARAUJO; HIGUSHI; CARVALHO JR., 1996; HIGUSHI, et al., 1998; NELSON et al., 1999 e SANTOS et al., 2001).

Levando em consideração que a obtenção dessas variáveis dendrométricas é de extrema importância para a predição da biomassa e que existem no mercado inúmeros dendrômetros capazes de medir o diâmetro ao longo do fuste de forma indireta para o cálculo do volume e da biomassa. Visando que através desta metodologia não há necessidade de derrubar as árvores, fato este que é de suma importância em áreas de conservação. O grande potencial de fixação de carbono na biomassa das árvores e o crescente interesse global por este assunto, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos alternativos de estimativa de biomassa e carbono. Desta forma, estudos para verificar e adequar um método preciso na estimativa volumétrica através da cubagem não destrutiva de árvores facilita o planejamento e a valorização dos povoamentos florestais.

## 1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo contribuir com uma metodologia não-destrutiva e precisa na determinação da biomassa em florestas baseada na utilização de dendrômetros ópticos, tanto no nível de árvores individuais e de parcelas amostrais.

## 1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos dividem-se em:

- (1) estudar a qualidade das medidas de cubagem da árvore em pé dos dendrômetros em termos de exatidão e precisão através da comparação com a cubagem rigorosa destrutiva das árvores na determinação do volume de madeira, analisando a qualidade das medidas no nível das árvores individualmente e das parcelas amostrais;
- (2) determinar a influência e precisão dos métodos não-destrutivos na determinação de biomassa florestal sobre os modelos empíricos e na predição gerada por eles no nível de árvores individuais e de parcelas amostrais.

## Referências

ARAÚJO, T.M.; HIGUSHI, N.; CARVALHO JR, J.A. Comparação de métodos para determinar biomassa na região amazônica, **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, Rio de Janeiro, v. 68, n.1, p. 35-41, ago. 1996.

BROWN, S.; GILLESPIE, A.J.R.; LUGO, A.E. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to inventory data, **Forest Science**, Maryland, v. 35, n. 4, p. 881-902, Dec. 1989.

FEARNSIDE, P.M. Wood density for estimating Forest biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Wisconsin, n. 90, p. 59-87. Oct. 1997.

HIGUSHI, N.; SANTOS, J.; RIBEIRO, R.J.; MINETTE, Y.B.M. 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, mar. 1998.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO<sub>2</sub> – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-145.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: JWiley & Sons, 1982. 402 p.

NELSON, B.W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J.L.G.; SOUZA, S.G.S.A.; BATISTA, G.T. COUTO, L.B. Allometric regressions for improved estimate of secondary Forest biomass in the central Amazon, **Forest Ecology and Management**, Winsconsin, n. 117, p. 149-167. Ago. 1999.

NOGUEIRA, EM.; FEARNside, P.M.; NELSON, B. Wood density in Forest of Brazil's "arc of deforestation": Implications for biomass and flux os carbon from land-use change in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Winsconsin, n. 248, p. 119-135, Mar. 2007.

PÁSCOA, F.; MARTINS, F.; GONZÁLES, R. S.; JOAO, C. Estabelecimento simultâneo de equações de biomassa para o pinheiro bravo. **In: SIMPÓSIO IBEROAMERICANO DE GESTIÓN Y ECONOMÍA FORESTAL**, 2., Barcelona. p. i-f, 2004.

PHILIP, M. S. **Measuring trees and forests**. 2.ed. New York: CAB International. 1994, 336 p.

SALATI, E. Emissão x seqüestro de CO<sub>2</sub> – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO<sub>2</sub> – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, p. 15-37, 1994.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C.R. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba :Universidade Federal do Paraná, 2002, p. 119-140.

SANTOS, J.; PAULA NETO, F.; HIGUSHI, N.; LEITE, H.G.; SOUZA, L.A.; VALE, B.A. Modelos estatísticos para estimar a fitomassa acima do nível do solo da floresta tropical úmida da Amazônia central. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 445-454, out, out. 2001.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Antecedentes: Métodos de Medição da Biomassa**

Caldeira (2003) ressalta que a quantificação da biomassa fornece informações sobre magnitude, qualidade e distribuição dos produtos da floresta que não se encontram nos tradicionais mapas dos ecossistemas. Seu conhecimento também é importante do ponto de vista ecológico, porque permite estabelecer a produção real de um sítio florestal além de permitir conhecer o crescimento, a produtividade e o ciclo dos nutrientes nos ecossistemas florestais tanto naturais como implantados.

A quantificação da biomassa florestal pode ser feita por dois métodos, o método direto, onde há a determinação do peso da biomassa fresca e seca e o método indireto, que estima a biomassa por meio de modelos matemáticos a partir de dados de inventários florestais. Estes fazem uma relação das variáveis como o volume da madeira, o DAP (diâmetro à altura do peito), altura comercial e total das árvores e o diâmetro da copa, os quais são relacionados com a biomassa (TEIXEIRA, 2003).

Segundo Salati (1994) os métodos indiretos são utilizados para estimar a biomassa de áreas florestais de grande extensão e, dependendo das informações disponíveis, são usadas relações empíricas entre a biomassa e algumas outras variáveis, determinando assim o valor da biomassa seca por hectare para então ser feita uma extrapolação para a área total considerada. Do ponto de vista prático, a determinação da quantidade de carbono fixada depende da magnitude da variável biomassa, a qual precisa ser estimada de forma fidedigna, caso contrário não haverá consistência na quantificação do carbono fixado nos ecossistemas florestais. Estudos do conteúdo de carbono em florestas vêm sendo desenvolvidos recentemente e a maioria versa sobre amostragem destrutiva da biomassa e ajuste de modelos empíricos para sua estimativa (MAESTRI et al., 2004).

### **2.2 Métodos de Medição do Volume da Madeira**

Tendo em vista os métodos de medição existentes, sabe-se que o tronco de uma árvore se assemelha a determinados sólidos geométricos. A base da árvore se assemelha a um neilóide, a face intermediária a uma parabolóide e a extremidade final a um cone (GOMES, 1957; CAMPOS, 1988; SCOLFORO e FIGUEIREDO FILHO, 1993; AVERY e BURKHART, 1997).

Se fosse possível determinar o início e o fim de cada figura geométrica ao longo do tronco, bastaria aplicar fórmulas correspondentes aos vários sólidos geométricos ocorrentes ao longo do perfil do tronco e o volume real da árvore seria obtido. Porém, este processo é praticamente impossível, o que levou ao desenvolvimento de metodologias (fórmulas) para fazer a cubagem rigorosa (GOMES, 1957). Prática esta que a árvore é dividida em seções, de comprimentos iguais ou não; por meio da utilização de fórmulas geométricas o volume dessas seções é obtido e, por adição destas partes, o volume da árvore é calculado (FAO, 1973). Conforme este mesmo autor, citado por Belchior (1996), é o método direto de estimação do volume de árvores mais utilizado na rotina de inventários florestais.

As principais fórmulas empregadas na cubagem rigorosa são a de Smalian, a de Huber e a de Newton, considerando que estas são válidas quando as seções assemelham-se a um tronco de parabolóide de revolução (THIERSCH, 2002). Machado e Figueiredo Filho (2006) também apontam estes três métodos como os que têm sido empregados por florestais de todas as partes do planeta, principalmente pelas facilidades de usos que os mesmos apresentam.

Um fato importante, segundo Scolforo e Figueiredo Filho (1993), é que a forma da árvore varia com a espécie, o espaçamento, a idade, o sítio e os tratamentos silviculturais. Como no Brasil o ritmo de crescimento das florestas plantadas e o manejo aplicado aos plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* é completamente diferente do aplicado nas coníferas e folhosas do hemisfério norte, é imprescindível avaliar se métodos que são adequados naquelas regiões e também os que são para nossas condições e qual o nível de compatibilidade destes em plantios no Brasil.

Gomes (1957) comenta que as medições diamétricas eram feitas a 0,30; 1,30; 3,30; 5,30 e assim sucessivamente, de 2 em 2 metros, porém as distâncias entre medições diamétricas podem ser alteradas em função da forma e da rigorosidade do processo de cubagem. Scolforo (1998) recomenda as seguintes distâncias de medições para *Eucalyptus* e *Pinus*: 0,05; 0,07; 1,30; 2,30 com comprimentos de seções entre 1 e 2 metros. Segundo os autores, este comprimento deve ser tal que se controle ao máximo o efeito da conicidade e que as seções sejam regulares. Já para árvores nativas, Scolforo et al.(1994) estabeleceram as seguintes distâncias de medições dos diâmetros: 0,30; 0,70; 1,30; 2,00 e assim sucessivamente, de metro em metro, até a altura desejada para a cubagem.

A cubagem rigorosa deve ser realizada por classe de diâmetro e de altura. Nestas condições e dentro de tratamentos silviculturais semelhantes, espera-se que os indivíduos tenham

forma semelhante e constante. Sendo assim, haverá uma constância nos volumes de todos os indivíduos pertencentes à mesma classe de altura e de diâmetro (GOMES, 1957).

De acordo com Cabacinha (2003) os métodos de cubagem rigorosa são divididos em métodos absolutos e relativos. Os métodos absolutos são aqueles em que o comprimento da seção (tora) não tem vínculo com o comprimento total da árvore.

Nos métodos relativos, o comprimento da seção ou tora representa um percentual do comprimento total da árvore, permitindo a comparação dos volumes individuais de árvores de tamanho diferente, porém com a mesma forma.

Dentre os vários métodos de obtenção do volume dos fustes das árvores, entretanto, o método de cubagem através do xilômetro é o único que fornece o valor paramétrico do volume, ou seja, o volume verdadeiro. Os demais métodos de cubagem conhecidos resultam do uso de expressões matemáticas que estimam com certa acuracidade o valor paramétrico do volume do fuste da árvore ou parte dele (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006).

A comparação dos volumes ditos reais, obtidos por diversos métodos de cubagem com o volume verdadeiro, obtido pelo xilômetro, pode não ser tão recente na história da atividade florestal. De acordo com Young et al. (1967), todos os livros texto de mensuração da Europa e América dos últimos cem anos, descreviam o método do xilômetro como aquele que determina o volume exato. Figueiredo Filho et al. (2000), Machado e Nadolny (1991), Martin (1984), Phillips e Taras (1987) e Young et al. (1967), utilizaram o xilômetro (técnica do deslocamento de água) como base para a comparação de vários métodos de cubagem, e até funções de afilamento e equações de volume.

Figueiredo Filho et al. (2000) utilizaram o xilômetro construído por Machado e Nadolny (1991) para testar a exatidão de três fórmulas tradicionais de cubagem (Smalian, Huber e Newton) e três métodos recentes (Spline Cúbica, Centróide e sobreposição de seções de Bailey). Além do volume total, os volumes comerciais para laminação, serraria e celulose foram também avaliados neste estudo. Depois de analisados os erros médios absolutos, os autores concluíram que a fórmula de Huber é a mais exata dos seis procedimentos estudados e deve realmente ser usada em todas as circunstâncias.

### **2.3 Medição do Tronco de Árvores e Cubagem Rigorosa**

Por outro lado, os autores anteriormente citados, que incluíram a fórmula de Smalian em seus estudos observaram que ela apresentou os piores desempenhos para estimar o volume verdadeiro. Fica claro também, o fato de que a fórmula de Smalian apresenta suas piores estimativas quando combinada com comprimentos de seção grandes, porém, o mesmo não acontece para comprimentos de seção menores. Fato este que é demonstrado por Machado e Figueiredo Filho (2006) revelando que a maioria das pesquisas desenvolvidas nesta área da dendrometria tem considerado como padrão o volume obtido por Smalian, dividindo-o a árvore em seções bastante curtas (20, 30 cm, etc).

Fato este verificado por Young et al. (1967) quando estudaram os erros na determinação do volume de toras ocasionados pela utilização das fórmulas de Smalian e Huber. Os erros foram calculados para diferentes comprimentos de seção, espécies e presença ou não de casca. Os resultados apresentados indicam que os erros da fórmula de Huber são menores e estatisticamente diferentes dos erros de Smalian para seções de 2,44 e 4,88 m de comprimento. Porém, para comprimentos de seção menores não houve diferenças significativas.

Assim, Husch et al. (1982) indicam o uso de Smalian para comprimentos menores que 1,2 metros. Ribeiro da Silva (1942) e Tinoco (1941) citados por Gomes (1957) também encontraram resultados que não apresentaram diferença estatística nas médias de volume através da cubagem rigorosa de árvores de pinheiro bravo pelos métodos gráfico, de Smalian e de Huber.

Gomes (1957) comenta também que os processos de cubagem de Huber e Newton conduzem a valores diferentes. O mesmo autor concluiu que a diferença entre as médias dos volumes calculados com as fórmulas de Huber e Smalian, relativos a um mesmo grupo de troncos, não diferem significativamente, sendo, portanto, o uso de um ou de outro método ligado somente ao hábito do mensurador.

Segundo Campos (1988), a fórmula de Newton utilizada para a cubagem rigorosa se destaca pela precisão proporcionada na determinação volumétrica, uma vez que se exige um maior número de medições de diâmetros numa determinada seção do tronco. Este mesmo autor menciona que, independentemente da fórmula utilizada para cálculo do volume, quanto menor for o comprimento da seção, maior precisão será obtida na determinação volumétrica.

Phillips e Taras (1987) compararam as fórmulas de Smalian, Huber, Newton, Grosenbaugh, tronco de neilóide e tronco de cone. Os métodos de cubagem foram comparados em diferentes comprimentos de seção, para diferentes classes diamétricas e com medidas tomadas

pela suta e fita diamétrica. Os resultados mostraram que o melhor desempenho em relação ao xilômetro foi obtido pelas fórmulas de Newton e de Huber, os quais forneceram estimativas melhores do que as outras três fórmulas, independente do instrumento de medição.

Husch et al. (1982) destacam que a fórmula de Newton é exata para todas as formas que uma seção possa assumir. Entretanto, seu uso não tem sido frequente, devido o maior número de diâmetros que o mesmo exige, sendo mais indicado para trabalhos de pesquisa (SCHREUDER et al., 1993).

Machado e Nadolny (1991) compararam, para *Pinus elliottii*, os métodos de cubagem absolutos de Smalian, Huber e Newton para os comprimentos de 1, 2, 4 e 6 metros, para árvores situadas em três classes de diâmetro (inferior, média e superior). Os autores utilizaram o volume obtido no xilômetro como base de comparação e concluíram que as fórmulas de Huber e Newton foram as que apresentaram melhor desempenho, tendo uma tendência a menores erros na porção intermediária do fuste. Nas seções do cone (ponta) os erros foram altos, entretanto não foram considerados significativos, pois são peças de pequeno volume e pouco representativos no volume total. Quando consideradas as seções da base, as fórmulas não foram satisfatórias. A fórmula de Huber na maioria dos casos apresentou melhor desempenho que as de Newton e Smalian, sendo essa última pior que as demais.

Machado et al. (2006) comparando diferentes métodos de cubagem absolutos (Smalian, Huber, Newton e Centróide) em 4 classes diamétricas e com diferentes comprimentos de seções (1, 2 e 4m) com os respectivos volumes obtidos pelo xilômetro, para Bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham.) encontraram diferença estatística em todos os tratamentos em relação ao xilômetro, sendo que todos os volumes tenderam a superestimar quando comparados com o volume verdadeiro. Dentre os métodos de cubagem, o método de Huber apresentou tendência de ser o mais exato, apesar de ter apresentado diferença estatística significativa com relação ao volume verdadeiro obtido através do xilômetro.

Manassés e Peichl (1986), Husch et al. (1982), também concluíram que o volume calculado pela fórmula de Huber, que mede apenas um diâmetro no centro da tora, é exato, quando a forma do tronco se aproximar de um cilindro. Contudo, se a forma do tronco for cônica ou tender a de um neilóide, os erros no cálculo do volume podem ser consideráveis.

Machado e Nadolny (1993), quando compararam, também em *Pinus elliottii*, os métodos de cubagem relativos da FAO, Hohenald e o Método Gráfico, usando como base de comparação



o xilômetro, concluíram que o método da FAO para 5 e 10 seções apresentou um desempenho ligeiramente superior à fórmula de Hohenald e que os volumes obtidos pelo método gráfico tiveram um desvio pequeno em relação aos volumes obtidos no xilômetro para as classes de diâmetro inferior e média, como já era esperado, porém apresentou um desvio relativamente alto para a classe de diâmetro superior sem uma explicação lógica para isso.

## **2.4 Dendrômetros Ópticos e Cubagem Rigorosa Não-Destrutiva**

A cubagem rigorosa é uma atividade realizada em separado das medições das unidades amostrais o que gera aumento no custo do inventário. Tal aumento pode ser reduzido se esta atividade for executada em medições simultâneas com as demais variáveis observadas, quando da medição das parcelas, contudo sem o abate das árvores (LEITE e ANDRADE, 2002).

Assim, a cubagem não destrutiva é um método indireto que pode ser utilizado para obtenção do volume e biomassa, porém, requer a medida de diâmetros ao longo do fuste da árvore em pé. Para suprir esta prática desenvolveram os dendrômetros ópticos, evitando assim que seja necessário escalar na árvore e medir os diâmetros com suta ou fita métrica, ou outro instrumento acoplado à hastes ou cabos. Trabalho este que não é muito prático e requer uma pessoa treinada em subir em árvores, sendo demorado e de grande dificuldade, pois se deve trabalhar em alturas elevadas, podendo levar a erros de medição (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006). Assim, os dendrômetros ópticos foram construídos especificamente para medir diâmetros a qualquer altura ao longo do tronco, surgindo novas metodologias para estimativa do volume de árvores em pé, através do Pentaprisma de Wheeler, Relascópio de Bitterlich, o dendrômetro de Barr e Stroud, o Criterion 400 e outros (ARNEY e PAINE, 1972).

O Pentaprisma de Wheeler, também chamado de cálibre ótico de Wheeler, é um dos mais comuns instrumentos óticos (WHEELER, 1962). Foi construído para medir diâmetros a qualquer altura e a qualquer distância da árvore. Consiste basicamente em um tubo de seção quadrada ou retangular, graduado na parte externa, possuindo dois prismas pentagonais no interior do tubo. O operador pode segurar o aparelho em suas mãos para medir os diâmetros ou montá-lo num tripé. É possível também fixar o hipsômetro Suunto a ele, como forma de controlar as alturas ao longo do fuste nas quais serão medidos os diâmetros (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006).

Avery e Burkhart (1997) afirmaram que testes com este aparelho indicaram que os diâmetros ao longo do fuste, até 50 metros de altura acima do solo, podem ser lidos com grande

acuracidade. A seguir, têm-se alguns trabalhos no Brasil em que a cubagem não destrutiva foi utilizada com este instrumento, segundo SCOLFORO et al. (1998) para *Pinus elliottii*; FISCHER et al. (2001) em *Pinus taeda*; SANQUETTA et al. (2003) para *Araucaria angustifolia*; CANALEZ et al. (2006) para lauráceas; CANALEZ et al. (2006) em povoamentos de *Araucaria angustifolia* e *Ilex paraguariensis*; entre outros.

O Relascópio de Bitterlich é outro instrumento que além das várias finalidades também possui a capacidade de medir diâmetros a diferentes alturas. Desenvolvido por Walter Bitterlich no final da década de 40 é um aparelho que através de escalas possibilita medir variáveis usualmente avaliadas em inventários florestais. Entretanto, vendo que o relascópio era acurado apenas para medição de diâmetros a pequenas distâncias, Bitterlich desenvolveu na década de 70 o Telerelascópio. Este além de fazer todas as funções do relascópio é capaz de medir diâmetros à distância com precisão (MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2006). Parkey (1997) demonstra que o telerelascópio pode ser utilizado em amostragem não destrutiva com precisão.

Recentemente, a tecnologia a laser tem sido muito usada nos últimos anos em inúmeras áreas através da construção de instrumentos apropriados. A empresa LASER TECHNOLOGY, INC. em 1987 começou trabalhar no desenvolvimento desta tecnologia para medição de variáveis dendrométricas (CARR, 1992, 1993).

Com isto, surgiu o Criterion, modelo 400, que segundo LIU et al. (1993) pode ser considerado a versão digital do Relascópio de Bitterlich, podendo ser usado também para medir diâmetro a qualquer altura, alturas, classe de forma, área basal do povoamento, inclinação do terreno em graus e em porcentagem, distâncias horizontais e inclinadas, ângulos horizontais e coordenadas para levantamentos topográficos, apresentados por um mostrador digital. Sendo que o mesmo tem capacidade de armazenar e guardar na memória podendo transferir para um computador para a execução de cálculos. Atualmente, existe no mercado um novo modelo do dendrômetro, o Criterion<sup>TM</sup> RD 1000, o qual extinguiu as medições de levantamentos topográficos que o tornava um aparelho bastante caro. Sendo que este ainda não possui pesquisas comprovando a sua acurácia.

O Serviço Florestal dos Estados Unidos a partir de 1990 iniciou os testes com o Criterion 400 para verificar o funcionamento do aparelho, comprovando que o mesmo possuía bom desempenho nas diversas tipologias do país ( CARR, 1992; DITUNO, 1993). LIU et al. (1993)

também concluíram que o Criterion 400 medindo diâmetros a diferentes alturas forneceu medidas com precisão.

Freitas e Wichert (1998) compararam a utilização do Criterion 400 com instrumentos tradicionais usados na medição de altura (Blume Leiss e Suunto) e do diâmetro (suta e fita métrica) e concluíram que o Criterion 400 apresentou variação significativa apenas dos resultados para o diâmetro, restringindo sua utilização.

Parkey e Matney (1998) compararam a utilização de três dendrômetros ópticos (Pentaprisma de Wheeler, Telerelescópio e o Criterion 400) na predição do volume, concluindo que não houve diferença significativa entre os mesmos. Entretanto, o Criterion 400 foi o instrumento que apresentou a melhor acurácia para o diâmetro e altura, e que o Pentaprisma de Wheeler foi o que obteve os piores resultados.

Williams et al. (1999) testaram a precisão dos dendrômetros ópticos Barr & Stroud FP15 e o Criterion 400, resultando que as medidas de diâmetro realizadas pelo dendrômetro Barr & Stroud foram mais precisas que o Criterion 400 e para altura não houve diferença significativa entre ambos instrumentos. Verificaram também que o único fator que influenciou na medição do diâmetro e da altura foi a distância entre o aparelho e a árvore. Sendo que o Criterion apresentou variação em ambas variáveis e o Barr & Stroud somente para altura com o aumento da distância.

Kalliovirta et al. (2004) avaliaram o funcionamento de um outro instrumento capaz de realizar medidas indiretas do diâmetro, o relascópio a laser, o qual é a combinação de um relascópio com um dendrômetro. Comparando os resultados obtidos, concluíram que o relascópio a laser demonstrou um erro padrão maior tanto para altura como para o diâmetro em relação ao Criterion 400 e ao Barr & Stroud. A acurácia foi dependente da distância entre o aparelho e o objeto, demonstrando também que o mesmo deve ser usado quando a floresta possui boa visibilidade.

Cabacinha (2003) visando estimar o volume suprimindo a cubagem rigorosa testou o método geométrico com o diâmetro correspondente à altura relativa  $(ht-2)/2$  medidos com o Pentaprisma de Wheeler e com o Relascópio de Bitterlich, porém, não encontrou resultados confiáveis. Este autor também determinou que a melhor intensidade amostral de árvores por parcela para estimativas volumétricas precisas foi de cinco árvores, quando a mensuração dos diâmetros foi a 0,3 m, 1,30 m e na altura relativa para a aplicação do método geométrico.

Clark et al. (2000) fizeram uma revisão sobre os dendrômetros existentes no meio florestal e comentam que dentre as vantagens que os instrumentos ópticos apresentam as principais são os benefícios pela economia de tempo, a redução do erro e aumento da capacidade de coletar, manipular e extrair maior número de informações. Como desvantagens estes pesquisadores relacionaram com a durabilidade, confiabilidade e potência desses equipamentos.

## Referências

ARNEY, D.J.; PAINE, D.P. Tree and stand volumes using height accumulation and telescopic Spiegel-relaskop. **Forest Science**, Washington, v.18, n.2, p.159- 168, June 1972.

AVERY, T.E.; BURKHART, H.E. **Forest measurements**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 408p. (McGraw-Hill series in forest resources).

BELCHIOR, P.R.M. **Estimação de volumes total, de fuste e de galhos em mata secundária no município de Rio Vermelho, MG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1996. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1996.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997. 55p.

CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CALDEIRA, M.V.W. **Determinação de biomassa e nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista Montana em General Carneiro, Paraná**. Curitiba, 2003. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal – UFPR. 176p.

CAMPOS, J.C.C. **Dendrometria**. Viçosa: UFV, 1988. 43p.

CANALEZ, G.G.; CORTE, A.P.D.; SANQUETTA, C.R. Dinâmica da estrutura da comunidade de lauráceas no período 1995-2004 em uma floresta de araucária no sul do estado do Paraná, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.4, p.357-367, 2006.

CANALEZ, G.G.; CÔRTE, A.P.D.; SANQUETTA, C.R.; BERNI, D.M. Dinâmica da *Araucaria angustifolia* (Bert.) o. Ktze. e *Ilex paraguariensis* St. Hil. em duas Florestas de Araucária no estado do Paraná, Brasil. **Revista Ambientia**, Guarapuava/PR. v. 2, n. 1, p.09-22, Jan/Jun. 2006.

CARR, W. Use of laser technology for tree measurement – present use and future development. Paper presented at Modern methods of estimating tree and log volume and increment. **Conference and Workshop** (IUFRO S4.02). June 14-16, West Virginia University, Morgantown, WV, USA. 8p. 1993.

- CARR, W. **Using laser technology for forestry and engineering applications**. Compiler, Morgantown, v.10, n.4, p. 5-16. 1992.
- CLARK, N.A.; WYNNE, R.H.; SCHMOLDT, D.L. A review of past research on dendrometers. **Forest Science**, Washington. v.46, n.4, p.570-576. 2000.
- DITUNO, E. Criterion model 400 use for strip cruising. Washington. Forest Service. 1993.
- FAO—FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Manual of forest inventory, with special reference to mixed tropical forest**. Roma, 1973. 200p.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; CARNEIRO, M. R. A. Testing accuracy of log volume calculation procedures against water displacement techniques (xylometer). **Canadian Journal of Forest Research**, Toronto, v. 30, n. 6, p. 990-997, June 2000.
- FISCHER, F.; SCOLFORO, J.R.S.; ACERBI JUNIOR, F.W.; MELLO, J.M.; MAESTRI, R.. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.167-188, 2001.
- FREITAS, A.G.; WICHERT, M.C.P. Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o Criterion 400. IPEF, **Circular Técnica**, n. 188, Piracicaba, p.1-7, 1998.
- GOMES, A.M.A. **Medição dos arvoredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.E. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: Ronald Press, 1972. 410 p.
- KALLIOVIRTA, J.; LAASASENAHO, J.; KANGAS, A. Evaluation of the Laser-relascope. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v.20, p.181-194, 2004.
- LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.3, p.321-328, 2002.
- LIU, C.J.; HUANG, X.; EICHEMBERGER, J.K. **Using laser technology for measuring trees**. Paper presented at Modern Methods of estimating tree and log volume and increment conference and workshop (IUFRO S4.02). Junho 14-16, West Virginia University, Morgantown, WV, USA. 1993. 13p.
- MACHADO, S. A.; NADOLNY, M. C. Comparação de métodos de cubagem de árvores e de diversos comprimentos de seção. In: CONGRESSO FLORESTAL E DO MEIO AMBIENTE DO PARANÁ, 3., 1991, Curitiba. **Anais**. Curitiba: APEF, 1991. v.1, p. 89-104.
- MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2006. 316 p.

- MACHADO, S.A.; NADOLNY, M.C. Acuracidade da cubagem rigorosa de árvores pelos métodos de Hohenadl, FAO e Gráfico, comparativamente ao xilômetro. In: **CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO**, 1.; **CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO**, 7., 1993, Curitiba. Anais... Curitiba: SBS-SBEF, 1993. p.478-480.
- MACHADO, S.A.; TÊO, S.J.; URBANO, E.; FIGURA, M.A.; SILVA, L.C.R. Comparação de métodos de cubagem absolutos com o volume obtido pelo xilômetro para bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham). **Cerne**, Lavras, v.12, n. 3, p. 239-253, jul./set. 2006.
- MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R.; MACHADO, S.A.; SCOLFORO, J.R.S.; DALLA CÔRTE, A.P. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o sequestro de carbono. Curitiba, 2004. **Revista Floresta**. n. 34 (3), Set/Dez. p.347-360.
- MANASSÉS, J.P.; PEICHL, B. Medição da madeira e inventário florestal. **Manual do técnico florestal: apostila do Colégio Florestal de Irati**. Campo Largo: Ingra, 1986. v.3, p.88.
- MARTIN, A. J. Testing volume equation accuracy with water displacement techniques. **Forest Science**, Washington, v. 30, n. 4, p. 41-50, 1984.
- PARKER, R.C. Nondestructive Sampling Applications of the Tele-Relaskop in Forest Inventory. **Southern Journal of Applied Forestry**. Washington., v.21, n.2, p. 75-83, 1997.
- PARKEY, R.C.; MARTNEY, T.G. Comparison of Optical Dendrometers for Prediction of Standing Tree Volume. **Southern Journal of Applied Forestry**. Washington, v.23, n.2, p. 407-417, 1998.
- PHILLIPS, D. R.; TARAS, M. A. Accuracy of log volume estimates by density and formulas compared with water displacement. **Forest Products Journal**, Morgantown, v. 37, n. 10, p. 37-42, Oct. 1987.
- SALATI, E. Emissão x sequestro de CO<sub>2</sub> - uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. In: **Seminário emissão x sequestro de CO<sub>2</sub> - uma nova oportunidade de negócios para o Brasil**. Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce. p. 15-37, 1994.
- SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; EISFELD, R. L. Crescimento, mortalidade e recrutamento em duas florestas de Araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.) no Estado do Paraná, Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava/PR. vol. 5, n. 1, p. 101-112. Jan/Jun 2003.
- SCHREUDER, H.T.; GREGOIRE, T.G.; WOOD, G.B. **Sampling Methods for Multiresource Forest Inventory**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1993. 446 p.
- SCOLFORO, J.R.; RIOS, M.S.; OLIVEIRA, A.D.; MELLO, J.M.; MAESTRI, R. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliottii*. **Cerne**, Lavras/MG. v.4, n.1, p.100-122, 1998.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal**: medição e volumetria de árvores. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 310p. (Curso de especialização “*lato sensu*” por tutoria à distância: manejo de Florestas Plantadas e Florestas Nativas).

SCOLFORO, J.R.S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Mensuração florestal 2**: volumetria. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 126p.

SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; ALMEIDA LIMA, C.S. Obtenção de relações quantitativas para estimativa de volume do fuste em floresta estacional semidecídua montana. **Cerne**, Lavras/MG, v.1, n.1, p.123-134, 1994.

TEIXEIRA, L.M. **Influência da Intensidade de Exploração Seletiva de Madeira no Crescimento e Respiração do Tecido Lenhoso das Árvores em uma Floresta Tropical de Terra-Firme na Região de Manaus**. Manaus, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas. 61p.

THIERSCH, C.R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus spp.*** 2002. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

WHEELER, P. R. Pentaprism Caliper for upper stem diameter measurements. **Journal of Forestry**, Washington, n. 60, p.877-78, 1962.

WILLIAMS, M.S.; CORMIER, K.L.; BRIGGS, R.G.; MARTINEZ, D.R. Evaluation of the Barr & Stroud FP15 and Criterion 400 Laser Dendrometers for Measuring Upper Stem Diameters and Heights. **Forest Science**. Washington. v.45, n.1, p. 53-61. 1999.

YOUNG, H. E.; ROBBINS, W. C.; WILSON, S. Errors in volume determination of primary forest products. **Pulp & Paper Magazine of Canada**, Quebec, v. 68, p. 389-394, 1967.

### 3 EXATIDÃO DE DENDRÔMETROS ÓPTICOS PARA DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE ÁRVORES EM PÉ

#### Resumo

O avanço da tecnologia a laser nos últimos anos possibilitou no mercado florestal o surgimento de dendrômetros capazes de mensurar variáveis dendrométricas de forma não destrutiva. Fato este, que é de suma importância quando deseja realizar estimativas sem que haja o corte das árvores. Desta forma, objetivou-se neste trabalho verificar a exatidão dos dendrômetros ópticos Criterion 400 e RC3H, estudando a qualidade das medidas de cubagem da árvore em pé através desses dendrômetros, na possibilidade da utilização destes em substituição ao método destrutivo, a cubagem rigorosa. O trabalho foi desenvolvido na Estação Experimental de Itatinga/SP que pertence a Universidade de São Paulo (ESALQ-USP). Amostraram-se no total 175 árvores em três parcelas de *Eucalyptus grandis*. O diâmetro do fuste das árvores em pé foi mensurado com os dois dendrômetros ópticos nas distâncias de 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 2,0 m e a partir deste de metro em metro ao longo do tronco até os 8 m de altura. Após a cubagem em pé foram derrubadas as árvores e obtido o diâmetro com uma suta e trena nas mesmas posições em que se realizou a cubagem não destrutiva. De posse dos diâmetros foram calculados o volume por secção e por árvore individual através da fórmula de Smalian para posterior comparação dos métodos. Analisando as medidas do diâmetro do fuste e volume por árvore percebe-se que os dois dendrômetros forneceram medidas subestimadas de modo geral, porém, o Criterion foi o que resultou nas melhores estimativas. Para o diâmetro e volume por árvore o Criterion demonstrou erros subestimados médios de aproximadamente 1 cm (10%), enquanto o RC3H resultou em erros superiores aos 5 cm (30%) em média. Portanto, quando se deseja maior confiabilidade e exatidão das variáveis observadas de forma não destrutiva, o Criterion deve ser priorizado.

Palavras-chave: RC3H; Criterion 400; Erros de medição; Amostragem não destrutiva

#### Abstract

Laser technology advancement in recent years allowed in the forest market emergence of dendrometers that can measure dendrometric variables with non-destructive way. This fact is very important when is wanted to make estimates without cutting the trees. Thus, this study aimed to verify the accuracy of the optical dendrometers Criterion 400 and RC3H by studying the quality of measures of wood volume determination of standing tree through these dendrometers, in the possibility of using these to replace the destructive method, the real cubic volume. The study was developed at the Experimental Station of Forest Sciences, in Itatinga/ SP wich belongs to the University of São Paulo (ESALQ / USP). Were sampled in total 175 trees in three plots of *Eucalyptus grandis*. The stem diameter of standing trees was measured by the two optical dendrometers at distances of 0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 2.0 meters from this point meter by meter along the stem up to 8 meters of height. After measuring the standing trees they were felled and the diameter was obtained with a caliper and a tape in the same positions that the non-destructive measures were taken. With the diameters the volume were calculated by section and by



individual tree by the Smalian formula for comparison of methods. Analyzing the measurements of stem diameter and the individual tree volume realizes that the two dendrometers provided measures generally underestimated, however, the Criterion was what resulted in the best estimates. For the diameter and individual tree volume the Criterion showed underestimated errors averaging approximately 1 cm (10%), while the RC3H resulted in errors greater than 5 cm (30%) on average. So, when want greater reliability and accuracy of the observed variables in a non-destructive way, the Criterion should be prioritized.

Keywords: RC3H; Criterion 400; Measurement errors; Nondestructive sampling

### 3.1 Introdução

A mensuração florestal é um importante elemento no manejo florestal, uma vez que fornece informações quali-quantitativas da floresta, permitindo, assim, tomadas de decisões mais precisas, além de possibilitar o melhor planejamento das atividades que norteiam esta área. Dentre das possíveis variáveis coletadas, as duas de maior relevância na realização de inventários florestais são, a altura e o diâmetro, que são usadas para o cálculo da área basal e do volume de madeira existentes em uma floresta (FREITAS e WICHERT, 1998).

Para a confiabilidade de um inventário florestal é necessário que se conheçam as suas fontes de erro, para assim tentar eliminar, ou ao menos minimizar o seu efeito sobre a precisão das medições. Em um inventário florestal os erros podem ser sistemáticos, relacionados com as medições, ou amostrais referentes ao sistema de amostragem utilizado (COUTO E BASTOS, 1988).

Segundo Perez (1989), os erros ocorridos nas medições dos diâmetros e alturas de árvores são devidos a erros do operador, defeitos no instrumento e nas condições de observação. Os erros cometidos na medição do diâmetro possuem uma maior ênfase quando comparado aos cometidos na medição da altura (COUTO et al., 1989).

Outra informação coletada em atividades de inventário é o volume das árvores. A cubagem rigorosa é um método tradicionalmente utilizado para quantificar o volume das árvores individuais. Para sua realização através de métodos destrutivos, torna-se necessário a derrubada das mesmas. Cubar uma árvore consiste em medir diâmetros a várias posições pré-definidas ao longo do fuste da árvore.

Esta prática como método destrutivo torna as atividades de inventário mais demoradas e com custos mais elevados, sendo particularmente problemática em florestas tropicais onde

existem árvores de grande porte. Entretanto, há métodos que possibilitam a utilização de dendrômetros que realizam a mensuração dos diâmetros ao longo do fuste sob forma não destrutiva, como o Relascópio de Bitterlich, Pentaprisma de Wheeler, Criterion, entre outros. Desta forma, o uso desses equipamentos sob forma não destrutiva são fontes de dados para desenvolver diversas relações empíricas entre as variáveis observadas.

O uso de relações empíricas é comum nas diversas áreas da ciência. Uma destas é o uso de equações de volume para obter o volume das árvores sem abatê-las, sendo que este procedimento não é uma solução, pois o desenvolvimento da relação empírica exige os dados fornecidos pela cubagem rigorosa. Quando a relação empírica é extrapolada de uma região, onde foi desenvolvida via amostragem destrutiva, para outra região, onde a amostragem destrutiva não é possível, surge a questão da representatividade da relação empírica, com os problemas inerentes à extrapolação (CASTRO et al., 2008).

Nos inventários florestais é cada vez mais comum a utilização de equipamentos eletrônicos nas atividades de mensuração florestal, tais como: suta eletrônica, coletores de dados e medidores de altura. Isto se deve ao fato de que estes equipamentos facilitam a coleta de dados, assim como a posterior manipulação dos mesmos (FREITAS E WICHERT, 1998).

Sabe-se que existem no mercado inúmeros aparelhos capazes de medir o diâmetro ao longo do fuste de forma indireta para o cálculo do volume. Visando que através desta metodologia não há necessidade de derrubar as árvores, fato este que é de suma importância em áreas de conservação, o grande potencial de fixação de carbono na biomassa das árvores e o crescente interesse global por este assunto. Tornando necessário o desenvolvimento de métodos de estimativa do teor de biomassa para verificar e adequar um método preciso na estimativa volumétrica através da cubagem não destrutiva de árvores, facilitando o planejamento e a valorização dos povoamentos. Diante desta tendência, o objetivo deste trabalho foi verificar a exatidão dos dendrômetros ópticos Criterion 400 e RC3H, por meio da comparação com o método destrutivo, a cubagem rigorosa, e avaliá-lo quanto a sua utilização por meio: do erro absoluto e relativo existente nas medidas do diâmetro do fuste fornecidas pelos aparelhos; do volume por seção de cada torete; do volume acumulado das seções e do volume total em nível de árvores individualmente e de parcelas amostrais.

### **3.2 Material e Métodos**

### 3.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga do Departamento de Ciências Florestais da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Localizada na região centro sul do Estado de São Paulo, a 23° 10' S e 48° 40' W, com 857 metros de altitude média. O clima da região segundo Köeppen é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), com precipitação anual média de 1308 mm. A temperatura média do mês mais frio 12,8 °C e a média do mês mais quente de 19,4 °C.

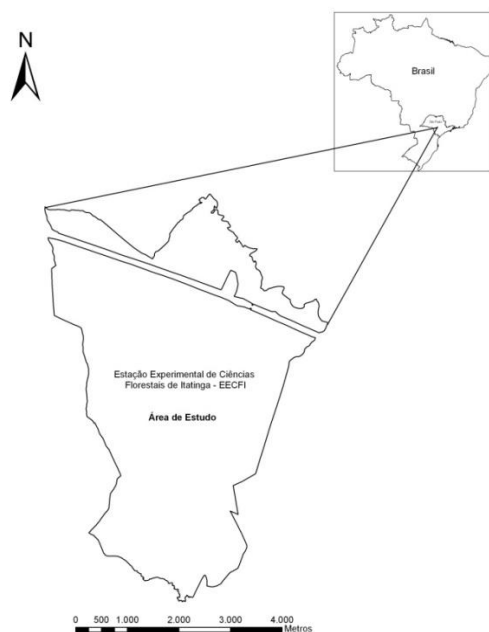


Figura 3.1- Áreas da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP.

As medidas de campo foram realizadas em um experimento de *Eucalyptus grandis* Maiden com 13 anos de idade e espaçamento 3 x 2 m.

### 3.2.2 Descrição dos dendrômetros

Foram utilizados dois dendrômetros de medição à laser para mensurar os diâmetros em diferentes alturas sob forma não destrutiva, o Criterion 400 e o RC3H da Savcor. A seguir, segue a descrição de cada um deles.

#### a) Criterion 400

O Criterion modelo 400 considerado por LIU et al. (1993) como a versão digital do Relascópio de Bitterlich, pode ser usado para medir:

- diâmetro a qualquer altura, alturas das árvores;
- classe de forma;
- área basal do povoamento;
- inclinação do terreno em graus e em porcentagem;
- distâncias horizontais e inclinadas;
- ângulos horizontais;
- coordenadas para levantamentos topográficos.

Possui também, a capacidade de armazenar na memória dados que podem ser transferidos para o computador, onde ocorre a execução de cálculos. O aparelho (Figura 2) contém uma lente reticulada em sua ocular para medição dos diâmetros a diferentes alturas.

#### b) **RC3H**

O RC3H é um dendrômetro digital da Savcor Masser que possui um holograma especial para maior exatidão na contagem eletrônica de ângulos exatos. Corrige automaticamente a inclinação do terreno, impermeável e possibilita a medição de altura das árvores, inclinação, volume, distância horizontal e diâmetros em diferentes alturas.



Figura 3.2 – Aparelhos utilizados para medições dos diâmetros a diferentes alturas. A) Criterion 400 e B) RC3H (Fonte: [www.grube.ba](http://www.grube.ba)).

### 3.2.3 Coleta de dados

As medições foram feitas em três unidades amostrais de 360 m<sup>2</sup>, sendo que cada parcela possuía em média, 60 árvores. Desta forma, foram mensuradas um total de 175 árvores no povoamento de eucalipto. O resumo dos dados por parcela encontra-se na tabela a seguir.

Tabela 3.1 - Resumo dos dados de dap, altura total e volume total por árvore para as três parcelas do povoamento de *Eucalyptus grandis*. Sendo que mín. e máx. representam o valor mínimo e máximo da variável de interesse observada na respectiva parcela.

| Parcela | dap (cm) |       |      | h (m) |       |      | v (m <sup>3</sup> ) |        |        |
|---------|----------|-------|------|-------|-------|------|---------------------|--------|--------|
|         | mín.     | médio | máx. | mín.  | médio | máx. | mín.                | médio  | máx.   |
| 1       | 10,0     | 15,9  | 20,8 | 15,7  | 25,3  | 28,4 | 0,0532              | 0,2464 | 0,4582 |
| 2       | 10,4     | 15,3  | 20,4 | 19,4  | 24,9  | 28,6 | 0,0794              | 0,2261 | 0,4394 |
| 3       | 10,9     | 15,2  | 19,0 | 19,0  | 24,8  | 28,5 | 0,0932              | 0,2186 | 0,3668 |

As medidas dos diâmetros a diferentes alturas foram tomadas a 0,1 m; 0,4 m; 0,7 m; 1,0 m; 1,3 m; 2,0 m e em intervalos de 1,0 m até a altura de 8,0 m, totalizando doze posições por indivíduo. Este procedimento foi feito com os dendrômetros Criterion 400 e RC3H, sob forma não destrutiva. Para medir os diferentes diâmetros com o RC3H utilizou-se a vara telescópica (vara graduada) para delimitar a altura desejada.

Depois de mensurados os diâmetros com os dois dendrômetros com os indivíduos em pé e numerados com placa metálica, derrubou-se as árvores com motosserra.

A cubagem rigorosa foi realizada com uso de uma trena e suta. Foram marcadas as mesmas medidas ao longo do fuste quando cubadas ainda em pé e a altura total. Após os 8,0 m seguiu-se intervalos de 1,0 m nas seções do tronco até que o diâmetro fosse menor que 5,0 cm. Para os diâmetros obtidos com a suta, foram feitas duas medidas em cada diâmetro, uma 90° em relação à outra e obtida à média. Os dados foram coletados utilizando o coletor eletrônico WRC da Masser.

### 3.2.4 Volume parcial por seção ao longo do fuste e total

O volume individual por seção e das árvores foi calculado pela fórmula de Smalian conforme MACHADO e FIGUEIREDO FILHO (2006). Desta forma, obteve-se o volume pelos três métodos, Criterion 400, RC3H e o volume considerado verdadeiro através da cubagem rigorosa. Para obter o volume a partir dos 8,0 m pelo Criterion 400 e pelo RC3H usou-se o fator de forma calculado pela expressão a seguir:

$$f_i = \frac{v.ponta_i}{\left(\frac{\pi * d_{8i}^2}{40000}\right) * (ht_i - 8)} \quad (1)$$

Onde:

$i$  = é o índice que se refere às árvores;

$v.ponta_i$  = é a diferença entre o volume sólido total da árvore ( $m^3$ ) e o volume sólido até 8,0 m da árvore ( $m^3$ );

$d_{8i}$  = diâmetro à 8,0 m de altura da cubagem rigorosa da árvore (cm);

$ht_i$  = altura total da árvore da árvore (m).

Assim, os volumes a partir de 8,0 m até a altura total para os métodos do Criterion 400 e RC3H foram obtidos:

$$vp_i = \frac{\pi * d_{8i}^2}{40000} * (ht_i - 8) * f_i \quad (2)$$

Onde:

$i$  = é o índice que se refere às árvores;

$d_{8i}$  = diâmetro à 8,0 m de altura da cubagem rigorosa da árvore (cm);

$ht_i$  = altura total da árvore (m);

$f_i$  = fator de forma da árvore.

Logo, os volumes totais pelo Criterion 400 e RC3H foram obtidos pela soma dos volumes das seções até 8,0 m de altura e pelo volume da ponta ( $vp_i$ ).

### 3.2.5 Cálculo dos erros individuais

Com os dados obtidos pelos três métodos foram calculados os erros absolutos e relativos para os diâmetros e para o volume por seção, acumulado e total. O erro absoluto da  $i$ -ésima árvore foi obtido da seguinte Fórmula 3.

$$e.ab_i = x.obs_i - x.med_i \quad (3)$$

Onde:

$i$  = é o índice que se refere às árvores;

$x.obs_i$  = valor do diâmetro (cm) ou volume observado ( $m^3$ ) da árvore obtido pela cubagem rigorosa;

$x.med_i$  = valor do diâmetro (cm) ou volume medido ( $m^3$ ) da árvore pelos métodos do Criterion 400 ou RC3H.

Logo, os erros relativos foram obtidos como descreve a Fórmula 4.

$$e.re_i = \frac{e.ab_i}{x.obs_i} * 100 \quad (4)$$

Onde:

$i$  = é o índice que se refere às árvores;

$e.ab_i$  = erro absoluto do diâmetro (cm) ou volume ( $m^3$ ) da árvore;

$x.obs_i$  = valor do diâmetro (cm) ou volume observado ( $m^3$ ) da árvore obtido pela cubagem rigorosa.

O erro individual médio de cada árvore fornecido pelos diferentes dendrômetros foi comparado com as medidas fornecidas da cubagem rigorosa convencional. Sendo assim, os erros negativos indicam superestimativas e os erros positivos indicam subestimativas em relação ao volume verdadeiro.

### 3.2.6 Erro no volume da parcela

Para análise dos erros no cálculo do volume das parcelas utilizou-se o método “*Bootstrap*”. Inicialmente tinha-se o volume gerado pelos três métodos diferentes, a cubagem rigorosa convencional, a cubagem com os diâmetros medidos com o Criterion e com os diâmetros medidos com o RC3H da Masser. Então, o método “*Bootstrap*” realiza diversas simulações através de uma determinada amostra. A ideia neste estudo foi re-amostrar o conjunto de dados, do volume das três parcelas de cada método, para analisar o comportamento dos erros gerados em nível de unidade amostral pelo volume por hectare. Foram geradas 1.000 parcelas de 60 indivíduos para cada método, sem pressupor distribuição de probabilidade qualquer. Assim, obtiveram-se valores médios do volume por hectare.

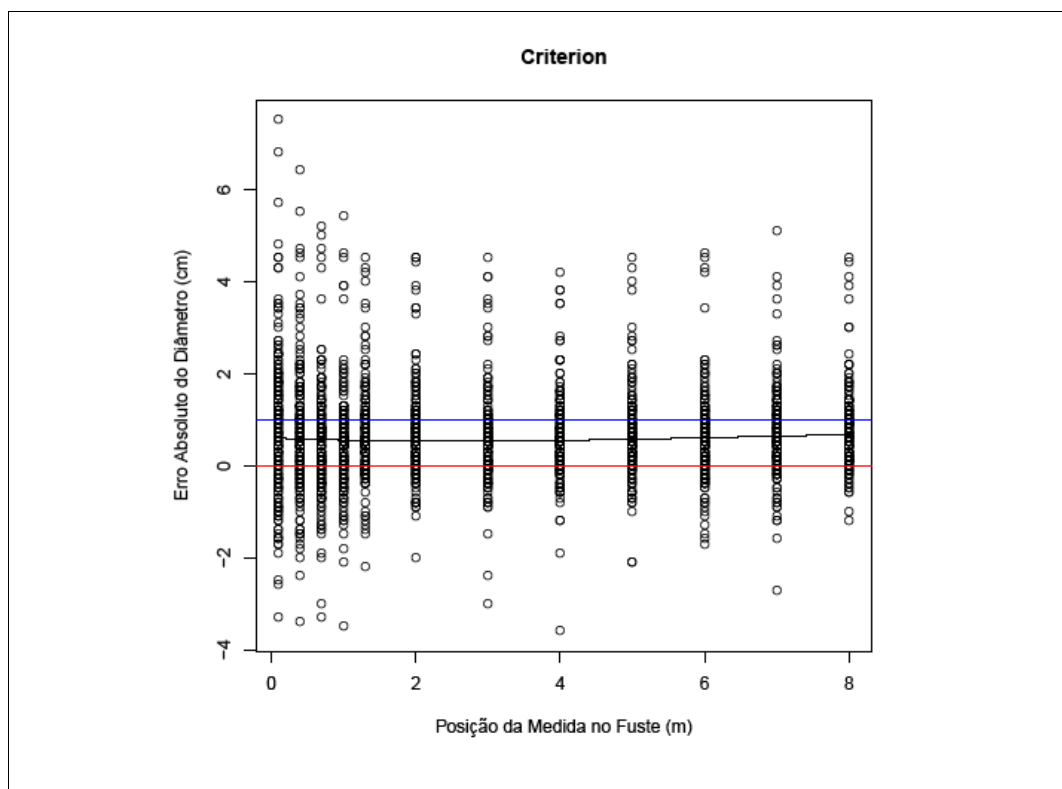
### 3.2.7 Análise dos dados

Foi realizada a comparação entre os diferentes dendrômetros para determinação do volume de madeira das árvores. As comparações foram realizadas tanto no nível das árvores individuais quanto no nível das unidades amostrais. Os valores das diferenças entre as medidas geradas através dos dendrômetros ópticos e os valores obtidos pelo método destrutivo ou de medição direta do tronco foram obtidas por meio de estatísticas descritivas (média, desvio padrão) e de análises gráficas visando caracterizar a distribuição das diferenças. As análises foram realizadas por meio do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

### 3.3 Resultados e Discussão

#### 3.3.1 Análise dos erros do diâmetro ao longo do tronco

A distribuição do erro absoluto das medidas dos diâmetros para os dois dendrômetros apresentou comportamentos distintos (Figura 3.1). As medidas provenientes do Criterion tiveram um comportamento quase que constante ao longo do fuste das árvores. Já aquelas resultantes do RC3H apresentaram um erro crescente a medida que se aumenta a posição da medida dos diâmetros no fuste.





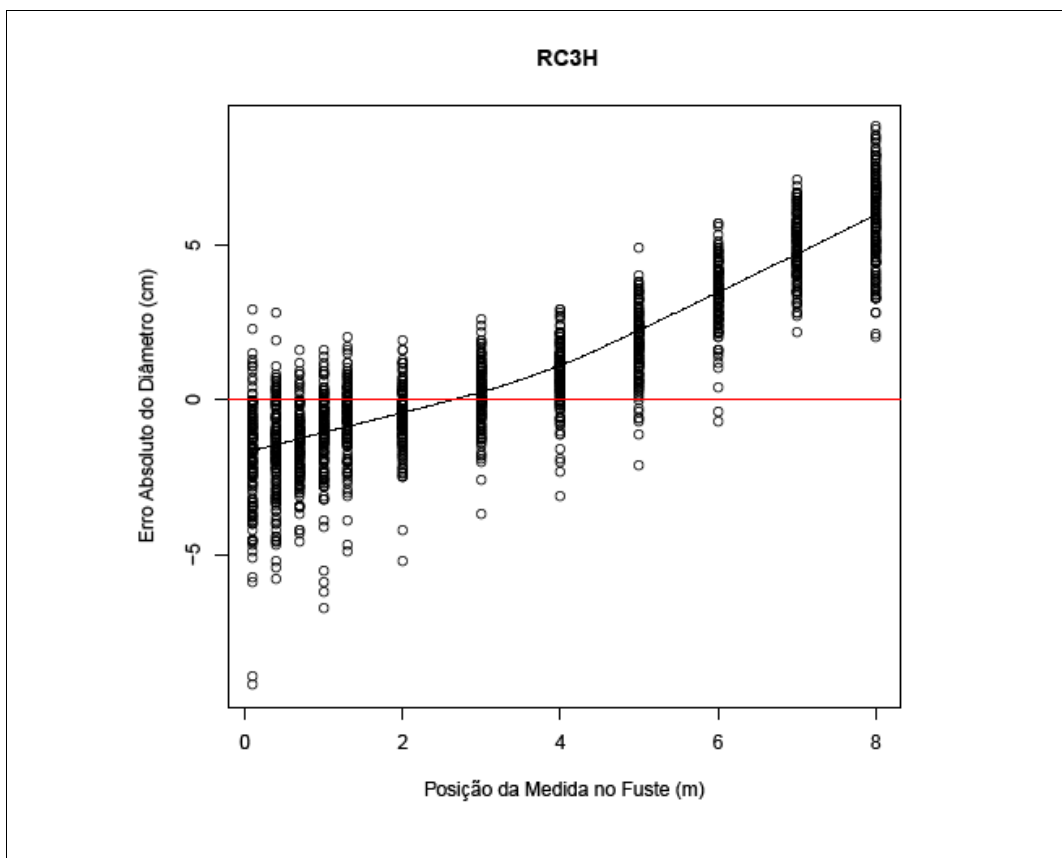


Figura 3.1 - Erro absoluto do diâmetro (cm) em relação à posição da medida do mesmo no fuste (m) para o Criterion e o RC3H da Masser.

O Criterion teve em média um erro menor que 1 cm nas leituras, sendo que estas representam valores subestimados, ou seja, os diâmetros resultantes do dendrômetro sob forma não destrutiva forneceram medidas menores que as observadas na cubagem rigorosa. Parkey e Matney (1998) analisaram a utilização do Criterion 400 e outros dois dendrômetros ópticos para a obtenção de medidas de forma não destrutiva. Estes verificaram que os erros médios no diâmetro também foram subestimados em 0,13 cm com o Criterion 400, em 0,86 cm com o Pentaprisma de Wheeler e para o Telerelascópio foi superestimado em 0,51 cm. Para a altura encontraram erro médio de 15,2 cm para o Criterion 400, de 48,8 cm para o Telerelascópio e de 51,8 cm com o Pentaprisma de Wheeler.

Logo, com o RC3H observa-se um erro crescente superestimado para as posições mais próximas ao solo, até cerca de 2 m de altura. Já naquelas acima de 2 m do fuste, o erro continuou crescente conforme se aumentava a posição de medida no tronco. Estas, em contrapartida, tenderam a serem subestimadas em média até 5 cm no diâmetro aos 8 m de altura. Percebe-se que o erro absoluto do diâmetro com o RC3H foi diretamente proporcional a medida que se aumenta

a posição do fuste das árvores. Por isso, levantamentos com este dendrômetro devem exigir maior cuidado na obtenção das suas variáveis e quanto ao nível de precisão exigidas nas suas medidas. Kalliovirta et al. (2005) avaliaram o funcionamento de um outro instrumento capaz de realizar medidas indiretas do diâmetro, o Relascópio a Laser, o qual é a combinação de um relascópio com um dendrômetro. Comparando os resultados obtidos, concluíram que o Relascópio a Laser demonstrou um erro padrão maior tanto para altura, como para o diâmetro em relação ao Criterion 400 e ao Barr & Stroud.

Encontrou-se no erro relativo do diâmetro (Figura 3.2) neste trabalho, um comportamento semelhante ao erro absoluto. Nos diâmetros obtidos com a mensuração do Criterion observa-se que o erro relativo mantevesse quase que constante ao longo do fuste. Esse erro foi inferior aos 10% nas diferentes posições ao longo do tronco, tendo como valor médio de 5%. Williams et al. (1999) encontraram medidas ainda mais precisas do que a deste trabalho. Estes autores tiveram erros superestimados médios no diâmetro ao longo do fuste de 0,12 cm, correspondendo a 0,40% e erro padrão de 1,43 cm para o Criterion. Diante destes valores, nota-se que as medições resultantes do Criterion parecem ser promissoras, devido apresentarem baixos valores de erros médios. Fato que pode representar apenas um viés existente nas medições com o mesmo. Outro dendrômetro que demonstrou alta precisão nas medidas foi o Relascópio a Laser, que segundo Kalliovirta et al. (2005) encontraram valores do diâmetro altura do peito ligeiramente superestimadas em 0,13 cm (0,7%) com erro padrão de 0,82 cm (5,9%), sendo estas, relativamente próximas as visualizadas neste trabalho. Em contrapartida, Freitas e Wichert (1998), testaram a utilização do Criterion 400 na obtenção de diâmetros e alturas de árvores e verificaram comportamento diverso aos apresentados. Estes autores encontraram erros de até 22 cm na medição do diâmetro com o Criterion, representando erros superestimados de aproximadamente 48%.

Já para o RC3H o erro relativo foi crescente ao longo do fuste, superestimado nas medidas até 2 m de altura e subestimado nos diâmetros acima dos 3 m de altura da planta. Nas medições acima de 6 m o erro relativo foi superior a 20% em média e continuou crescente. Diante desses, sabe-se que o RC3H pode subestimar em até 40% aquelas tomadas em alturas mais elevadas. Couto et al. (1989) estudando os erros cometidos na medição do diâmetro e da altura de árvores, percebeu que um erro de 1 cm na determinação do diâmetro correspondeu a um máximo de 19% no cálculo do volume. Considerando que o erro aceitável em um inventário florestal deve ser

menor que 10%, os erros de até 5 cm no diâmetro deste trabalho, podendo chegar aos 40%, como apresentado para o RC3H, podem então, afetar de modo representativo na obtenção do volume das árvores por fornecer valores com um erro superior ao desejável.

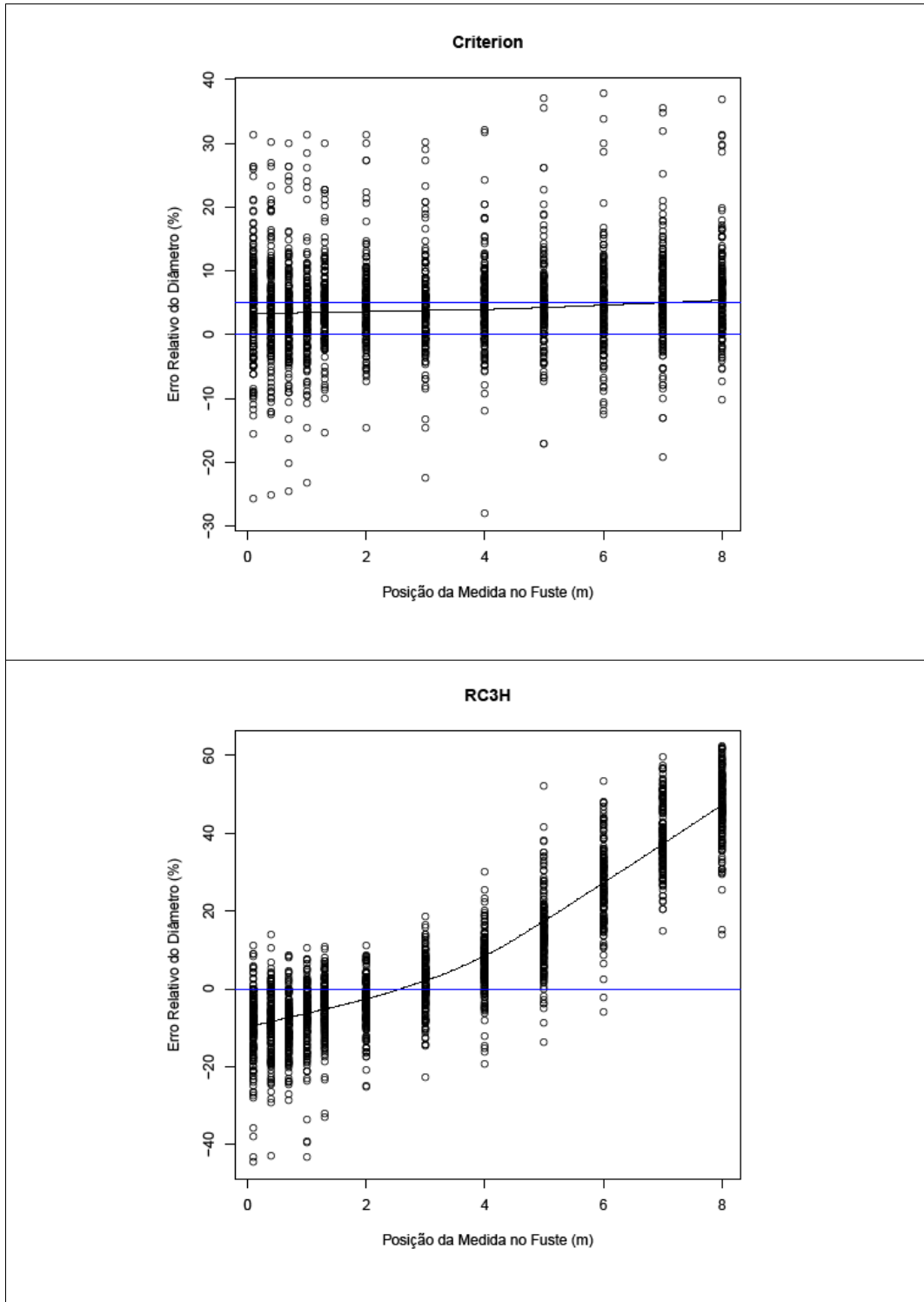
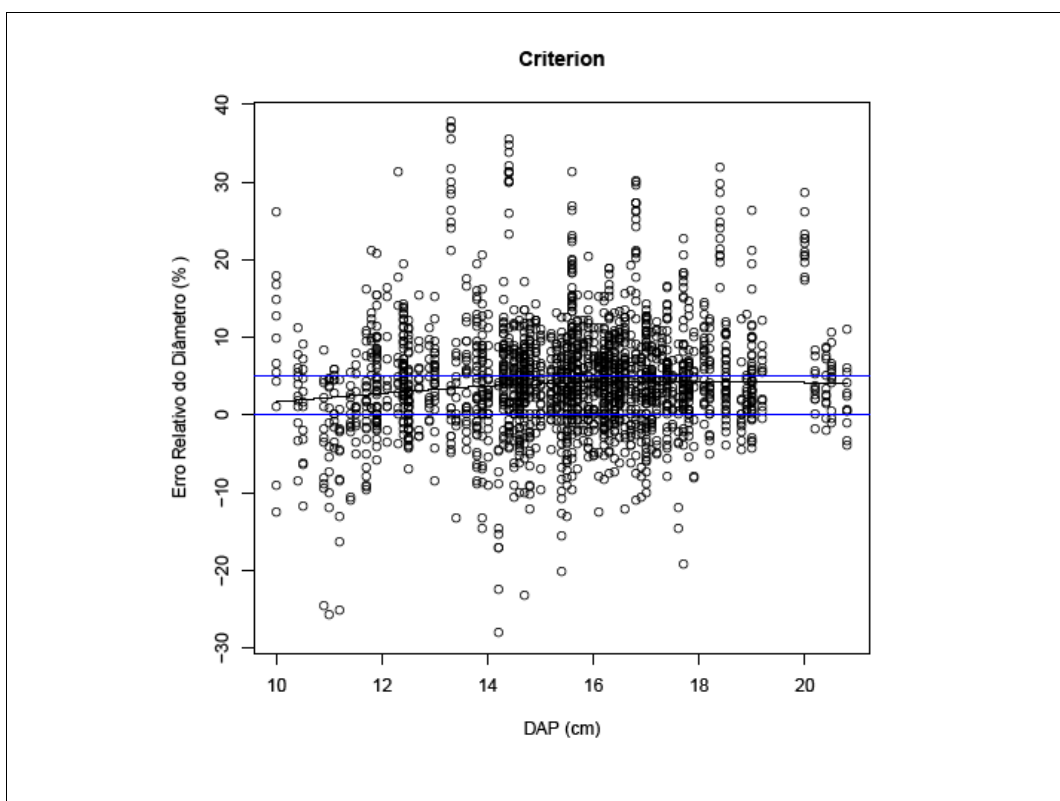


Figura 3.2 - Erro relativo do diâmetro (%) em relação a posição da medida do mesmo no fuste (m) para o Criterion e o RC3H da Masser.

A distribuição do erro relativo do diâmetro em relação ao DAP das árvores (Figura 3.3) apresentou comportamento diferenciado entre os dois instrumentos estudados. O diâmetro obtido por meio do Criterion demonstra uma distribuição mais homogênea, um erro subestimado médio inferior a 5%. Nota-se que para os DAP's de até aproximadamente 14 cm foi crescente, após esses, tende a tornar-se constante com o aumento do diâmetro das árvores. Para as medidas do RC3H observa-se uma heterogeneidade maior na distribuição do erro, teve uma subestimava em média inferior aos 10%. Sendo decrescente com o aumento do DAP até 14 cm e após esse, tende a tornar-se constante com o aumento do mesmo.



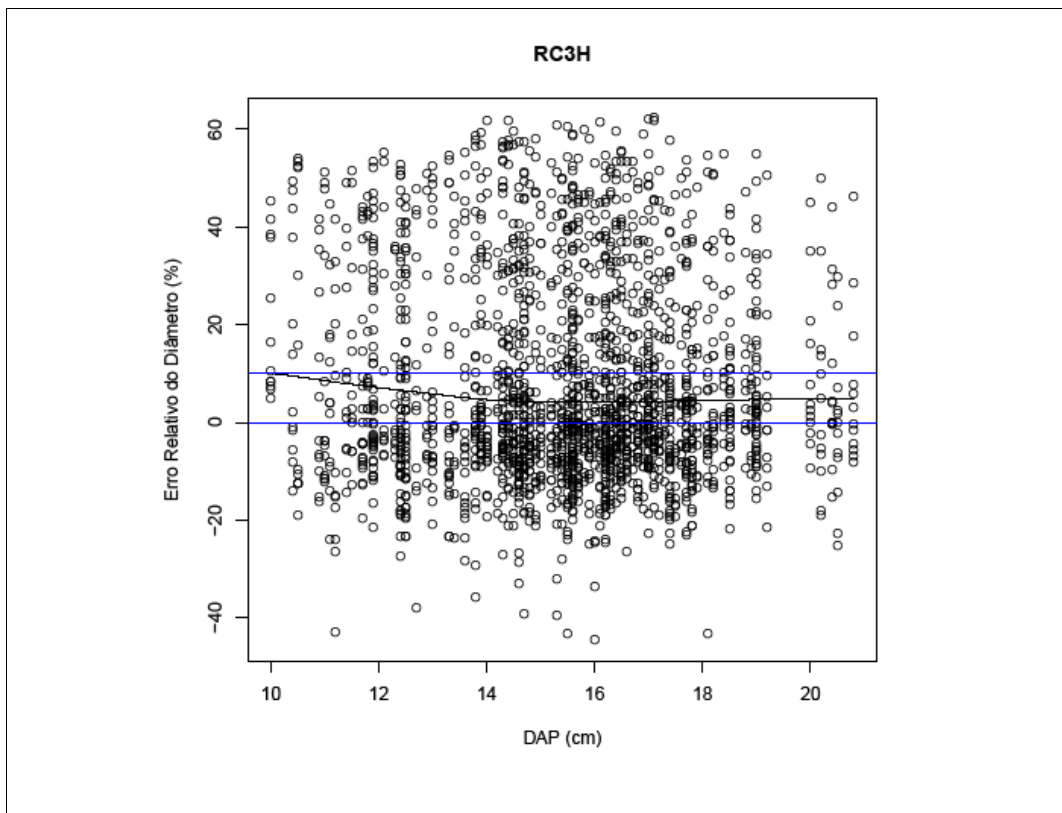


Figura 3.3 - Erro relativo do diâmetro (%) em relação ao DAP (cm) das árvores para o Criterion e o RC3H da Masser.

### 3.3.2 Erros no Volume por Seção e Acumulado

Analisaram-se os erros das medidas dos dendrômetros na quantificação do volume da seção por torete e no volume acumulado da árvore. Os erros absolutos do volume na seção por torete ( $m^3$ ) em função da posição (m) em que os diâmetros foram obtidos para o Criterion e o RC3H (Figura 3.4).

O volume na seção por torete ( $m^3$ ) em função da posição do fuste (m) com o Criterion apresentou erro absoluto médio subestimado de  $0,0118 m^3$ . Percebeu-se também que, com o aumento das posições do fuste das árvores o erro volumétrico tendeu a ficar constante. Novamente o dendrômetro RC3H registrou um erro absoluto no volume por torete ( $m^3$ ) crescente à medida que se avançou nas posições do tronco, ou seja, quanto mais alta for realizada a mensuração do diâmetro, maior será o erro proveniente da mesma no volume da seção. Fato este, que pode ter influência da distância que o observador se encontra da árvore e pelo aumento da dificuldade de visualização do diâmetro. Kalliovirta et al (2005) e Williams et al (1999) também concluíram que com o aumento da distância, observador-árvore, diminuiu a confiabilidade dos diâmetros obtidos com dendrômetros de tecnologia a laser.

Os principais fatores que exercem grande influência para acréscimo do erro nas medições não destrutivas segundo Kalliovirta et al (2005), são a presença de líquens e a casca parcialmente solta no tronco, e em povoamentos muito densos e com alta ramificação. Já Williams et al. (1999) relatam que um dos maiores problemas na visualização do tronco das árvores com um relascópio à laser foi a paisagem que se encontra atrás deste indivíduo. Ou seja, quando o fundo for agrupado com fustes da mesma espécie, muitas vezes, dificulta a visualização das partes do tronco que se deseja mensurar. Como também as condições de luminosidade do povoamento também agravam esses problemas.

Williams et al. (1999) verificaram também se o operador do instrumento exercia efeito significativo na acurácia das medidas com o Criterion 400 e com o Barr & Stroud FP15. Estes perceberam que independente do operador as medidas do diâmetro e da altura pelo Barr & Stroud apresentaram um erro sistemático superestimado. Entretanto, com o Criterion não houve uma tendência nas medidas. Demonstrando assim, que o Barr & Stroud exige uma calibração específica para que se evite tal erro.

Ferguson et al. (1984) já dizia que a calibração deve ser executada quando se deseja reduzir os erros sistemáticos causados pelo instrumento ou na modelagem dos dados. Clark et al. (2000) levanta que o viés do observador é muitas vezes fator chave e pode afetar significativamente nas medições, embora mais comum que seja um efeito de instrumentação ou erro metodológico.

As principais fontes de erro do Criterion 400, segundo Freitas e Wichert (1998) são: dificuldade de visualização do topo das árvores; cansaço devido ao esforço físico realizado pelo operador, uma vez que o aparelho pesa em torno de 4 kg, sendo que este efeito pode ser amenizado através do uso de um tripé; dificuldade de ler com precisão os valores do retículo da luneta para a medição de diâmetro; falhas de reflexão das ondas emitidas pelo aparelho, principalmente se as folhas das árvores estiverem molhadas e se houver a presença de um sub-bosque muito denso, a utilização de um filtro poderá ser necessária para evitar que as ondas sejam refletidas por outras superfícies que não a da árvore levantada.

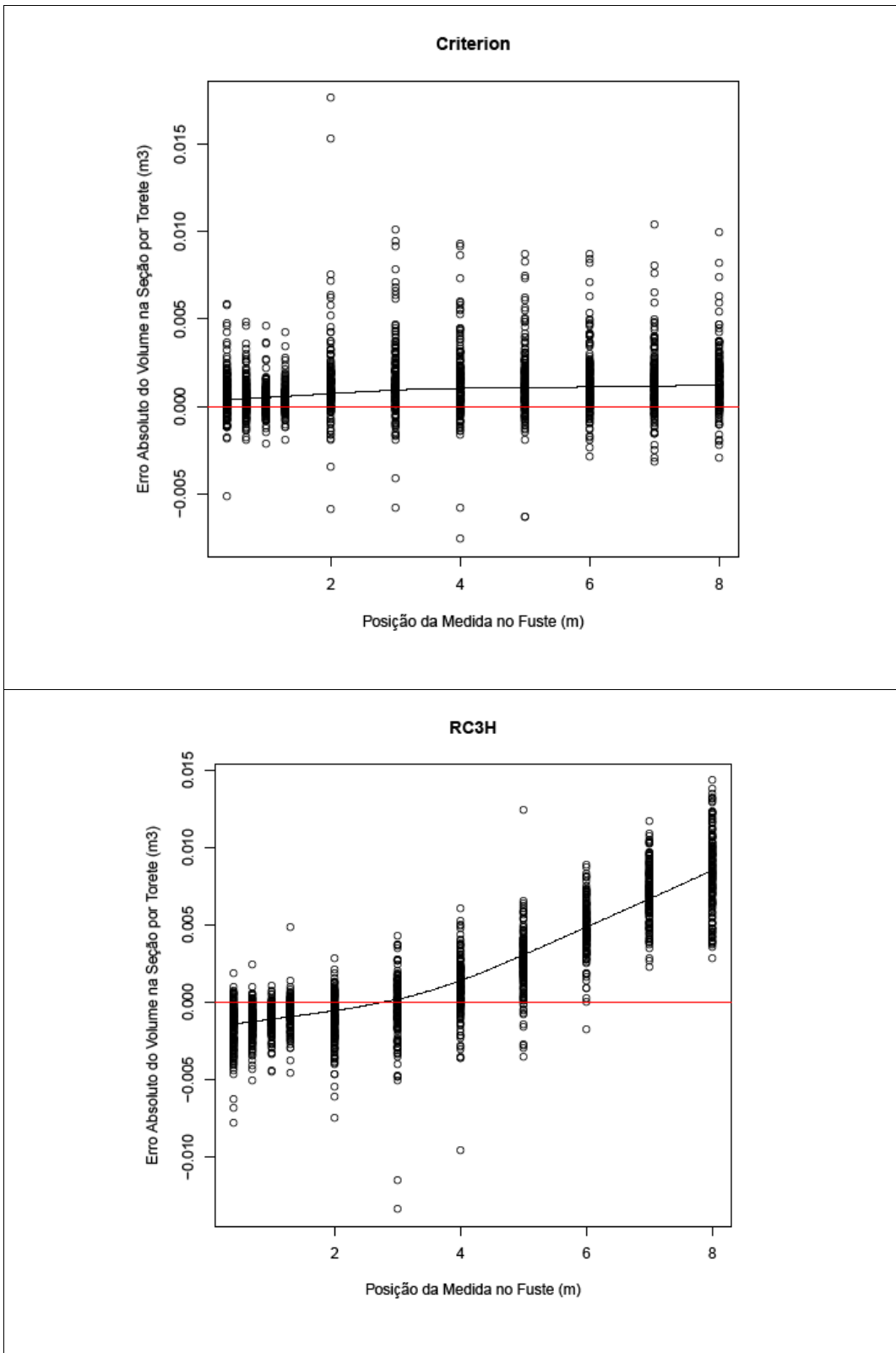
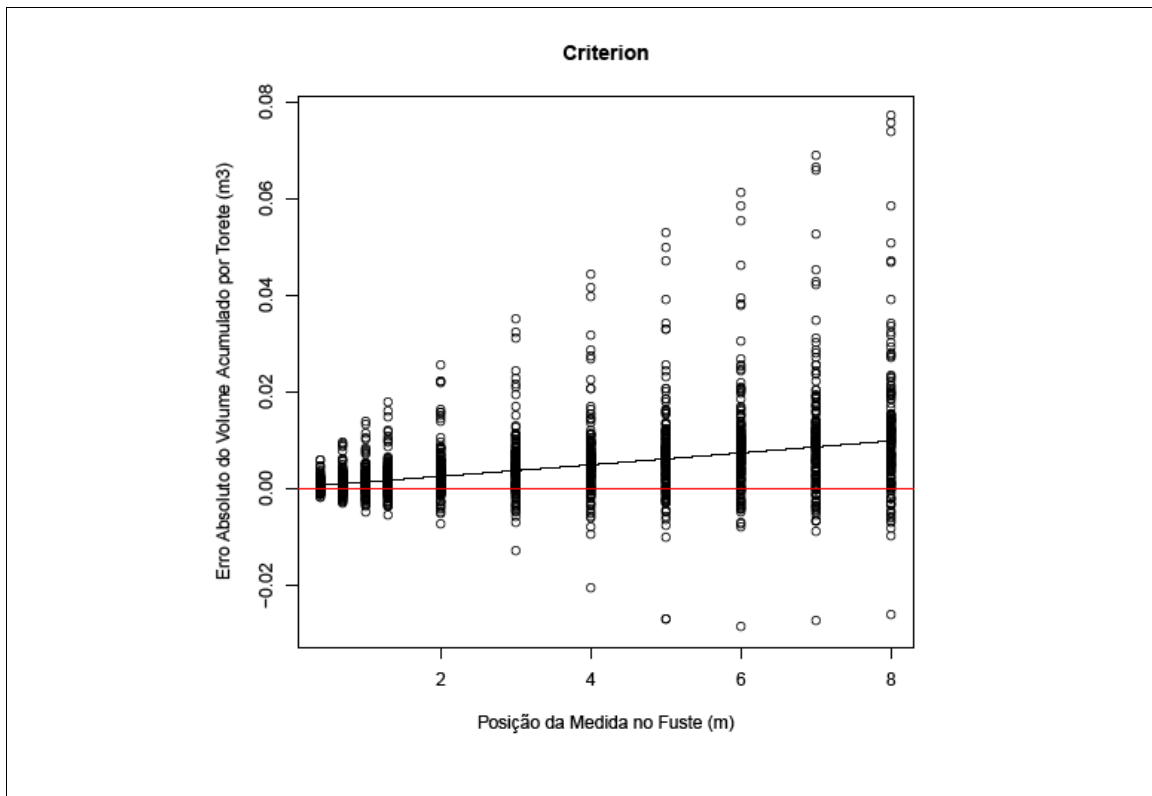


Figura 3.4 - Erro absoluto do volume na seção por torete ( $m^3$ ) em função da posição (m) em que os diâmetros foram obtidos no tronco para o Criterion e o RC3H.

O volume acumulado por torete ( $m^3$ ) demonstra um erro crescente e subestimado em função do aumento da posição em que se obtém a medida no fuste (m) da árvore para o Criterion (Figura 3.5). Logo, com o RC3H (Figura 3.5) houve um erro médio superestimado até os 4 m de altura, e após essa posição, o erro subestimado demonstrou ser diretamente proporcional com o aumento das posições no fuste. Resultados estes, explicados pela mesma conduta que o erro no diâmetro que ambos os aparelhos demonstraram.





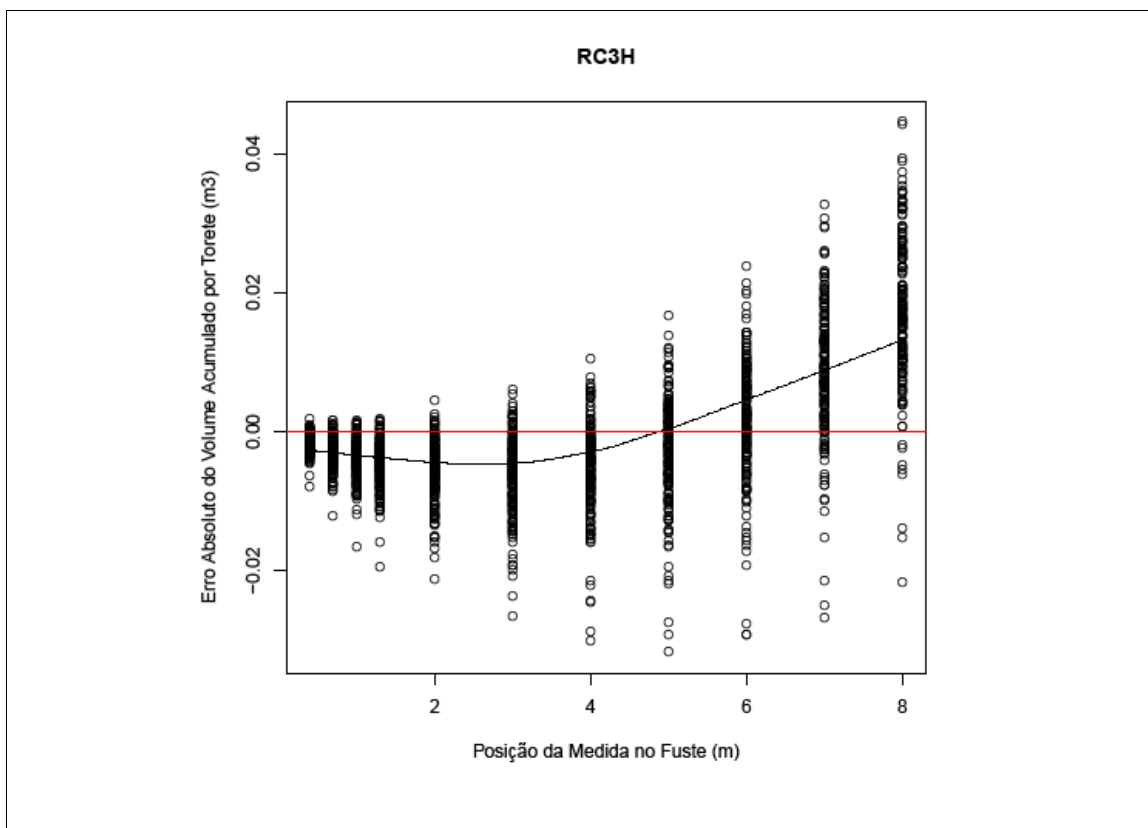


Figura 3.5 - Erro absoluto do volume acumulado por torete (m<sup>3</sup>) em função da posição (m) em que os diâmetros foram mensurados no fuste da árvore para o Criterion e o RC3H.

Analisou-se o erro relativo do volume acumulado por torete (%) em função da posição (m) em que os diâmetros foram obtidos para o Criterion e para o RC3H (Figura 3.6). Percebe-se que o comportamento do erro relativo foi semelhante aos vistos para o diâmetro em função das posições do fuste. O Criterion novamente exibiu erros médios subestimados constantes inferiores aos 10% no volume acumulado por torete com o aumento das posições do tronco. O RC3H indicou mais uma vez o mesmo comportamento para o erro relativo no volume acumulado por torete (%). Nas observações mais próximas do solo o erro médio superestimado resultou em média próximo dos 20%. A partir dos 6 m de altura o erro no volume acumulado por torete foi crescente e subestimado com o aumento da altura.

Sabe-se que o diâmetro é a variável independente mais importante nos modelos matemáticos para a obtenção do volume. Assim, o erro absoluto no volume na seção e acumulado por torete (m<sup>3</sup>) comportam-se da mesma forma que os do diâmetro. Isto é, quando observados os diâmetros com o Criterion o erro registrado foi quase que constante ao longo do fuste das árvores, já os com o RC3H foram na maioria das vezes crescentes com o aumento das posições em que se

mensurava-se o diâmetro. Portanto, percebe-se que a utilização do dendrômetro Criterion forneceu de modo geral estimativas mais precisas que o RC3H.

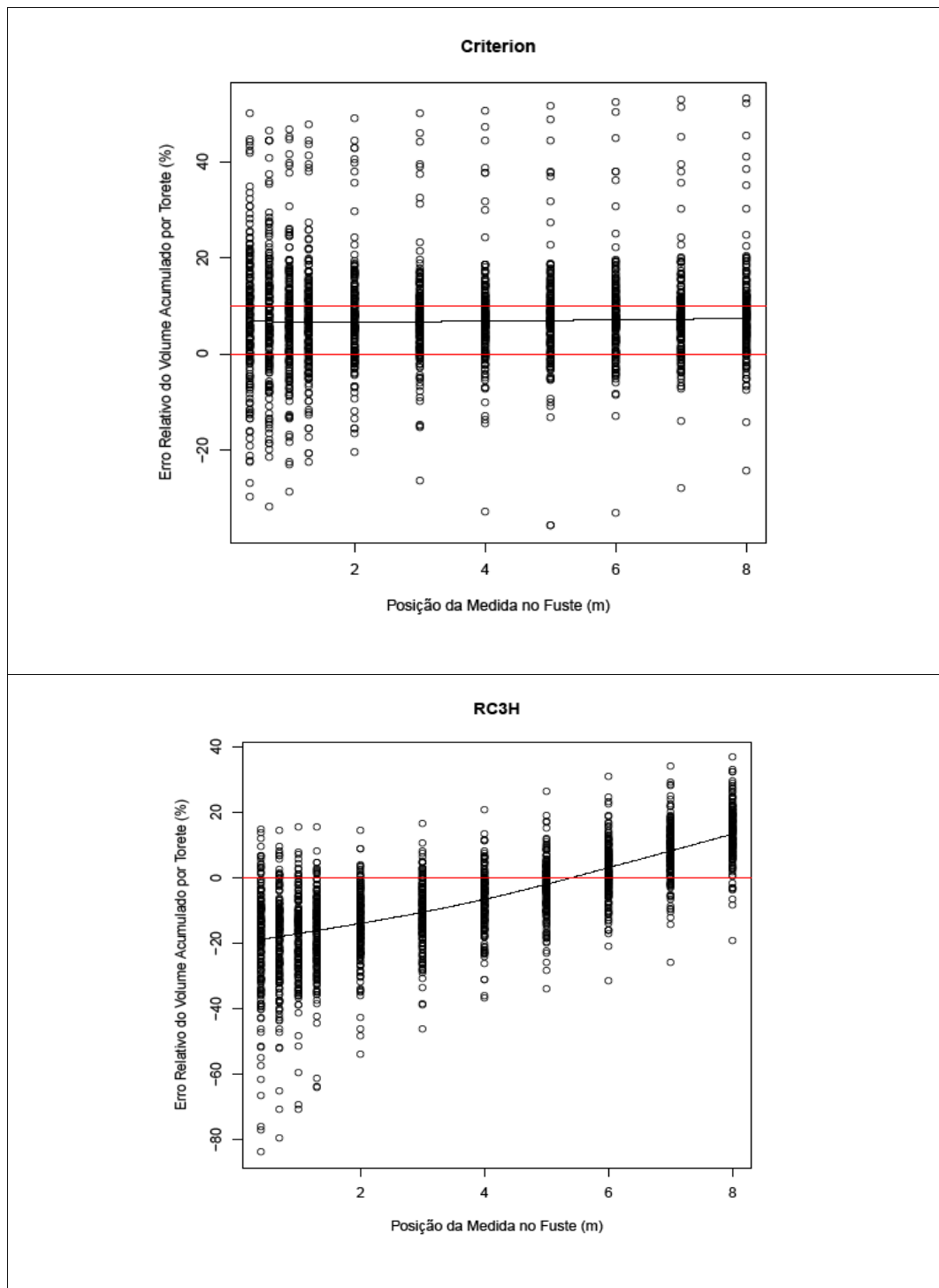
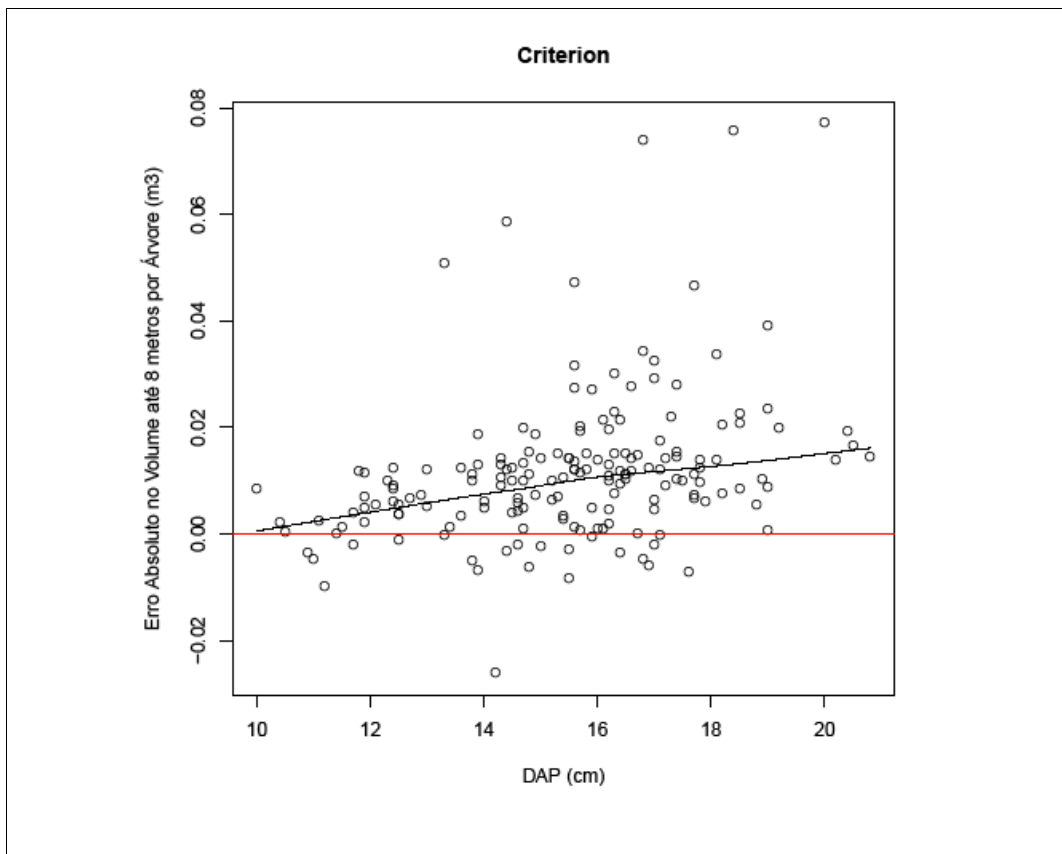


Figura 3.6 - Erro relativo do volume acumulado por torete (%) em função da posição (m) em que os diâmetros foram obtidos para o Criterion e o RC3H.

### 3.3.3 Erro do Volume da Árvore

Verificou-se o erro absoluto ( $m^3$ ) e relativo (%) do volume até 8 m, pelos dendrômetros ópticos, e também para o volume total da árvore, utilizando o fator de forma individual.

O erro absoluto do volume ( $m^3$ ) até os 8 m em relação ao DAP (cm) das árvores apresentou comportamento desuniforme (Figura 3.7). Percebe-se que a distribuição do erro absoluto no volume ( $m^3$ ) para o Criterion seguiu um padrão mais uniforme em relação ao erro do volume do RC3H, sendo que ambos foram subestimados. Com o Criterion o erro no volume apresentou-se uma tendência de ser diretamente proporcional ao DAP das árvores. Logo, com o RC3H foi possível observar que as medidas foram mais dispersas e que o erro foi superior ao encontrado pelo Criterion.



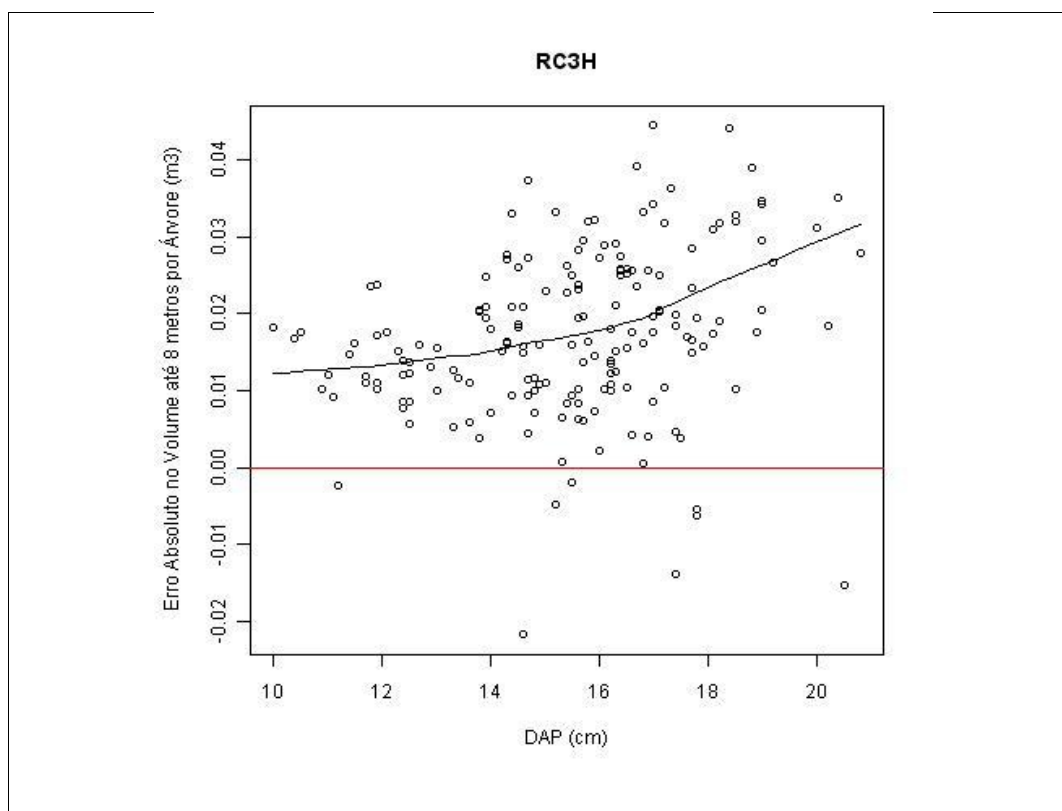


Figura 3.7 - Erro absoluto do volume ( $m^3$ ) até 8 m em relação ao DAP (cm) das árvores para o Criterion e para o RC3H.

O volume total por árvore ( $m^3$ ) obtido por meio do fator de forma individual demonstrou uma distribuição distinta em relação aos dois dendrômetros e ao erro gerado no volume até os 8 m (Figura 3.8). Para o Criterion o erro volumétrico aumentou com o DAP e não ultrapassou  $0,05 m^3$  em média. Entretanto, com o RC3H esse erro foi crescente com o DAP das árvores e para os maiores indivíduos atingiu erros absolutos superiores a  $0,15 m^3$  no volume por árvore.

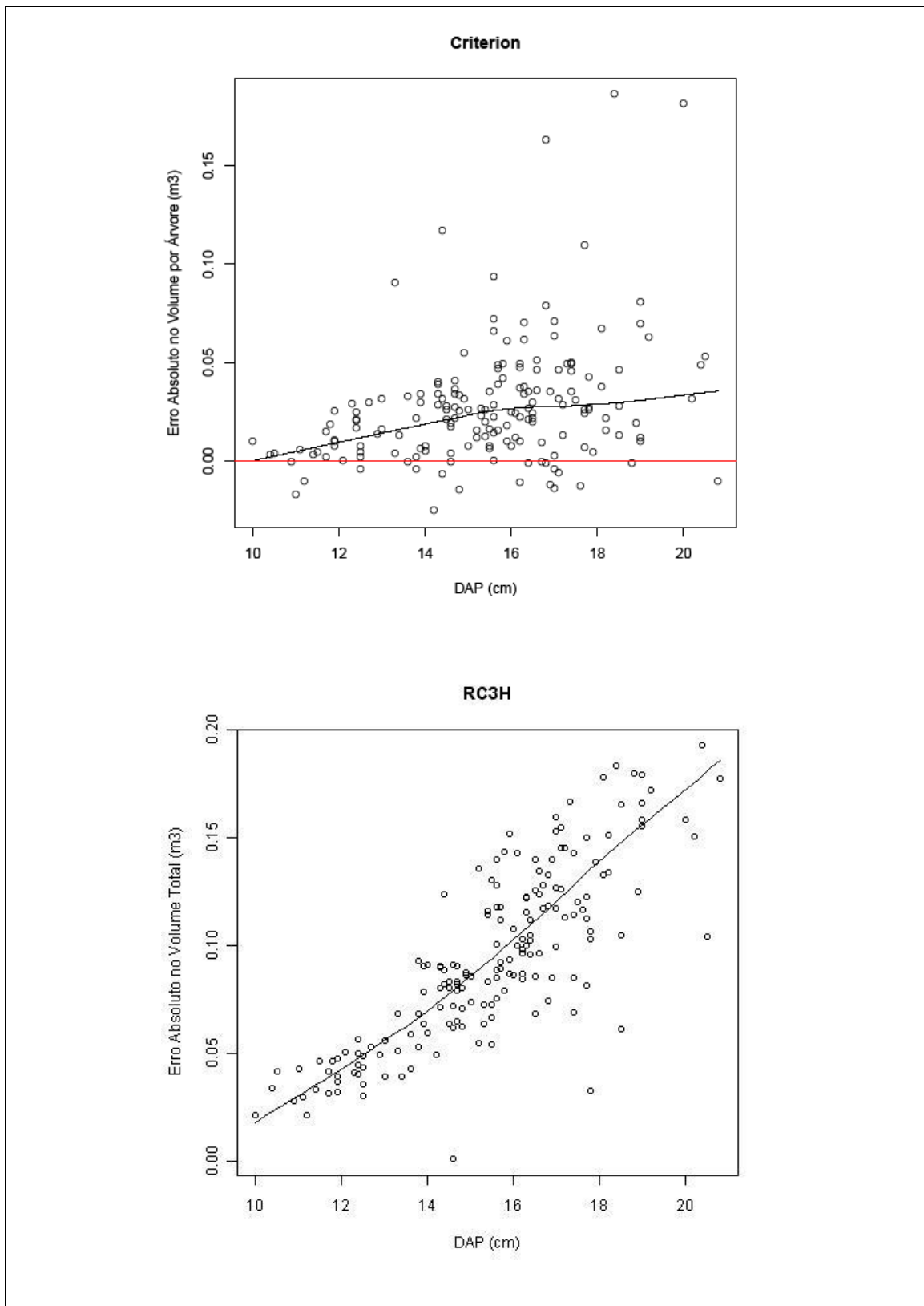
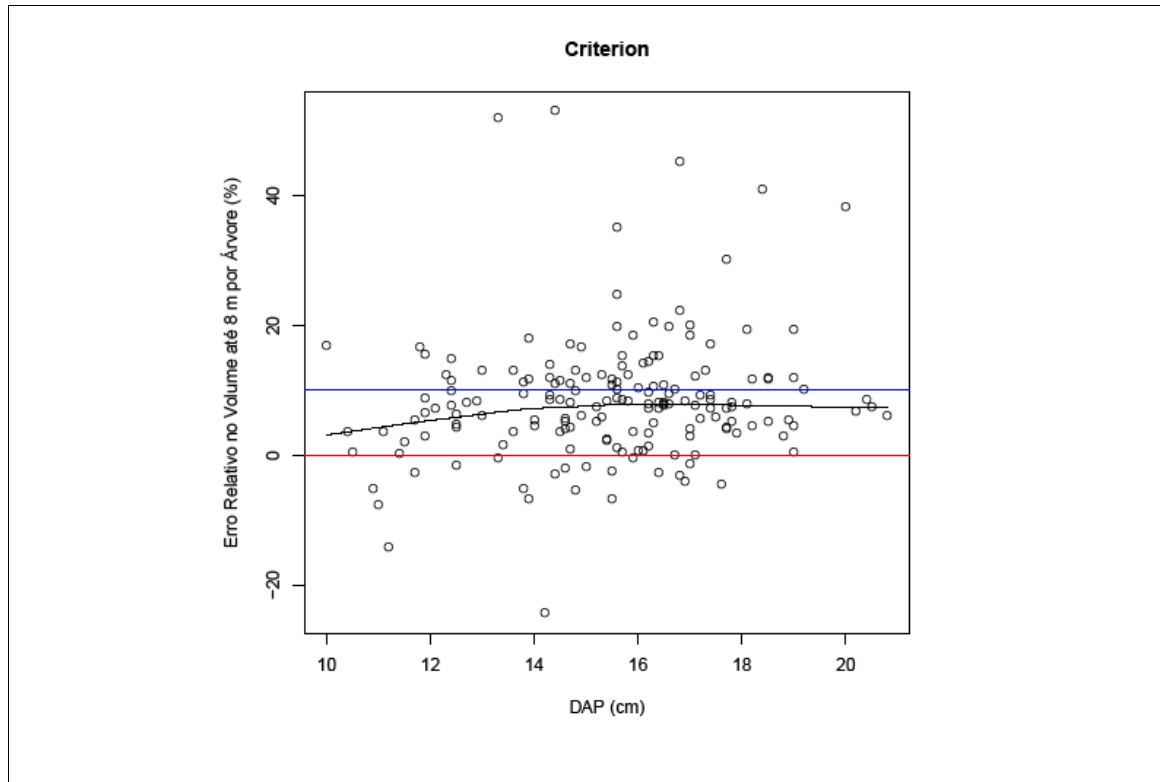


Figura 3.8 - Erro absoluto no volume total por árvore ( $m^3$ ) em função do DAP (cm) dos indivíduos para o Criterion e para o RC3H.

A distribuição do erro relativo no volume (%) até 8 m de altura para os dendrômetros possuíram uma distribuição distinta (Figura 3.9). Em média o erro relativo não ultrapassou os 10% com as medidas do Criterion, este foi crescente para os indivíduos de menor DAP e tendeu a tornar-se constante com o aumento do DAP. Porém, com o RC3H o erro foi decrescente para as árvores de menor diâmetro, tendeu a tornar-se constante com o aumento do mesmo e foi em média superior aos 10% encontrados com o Criterion.



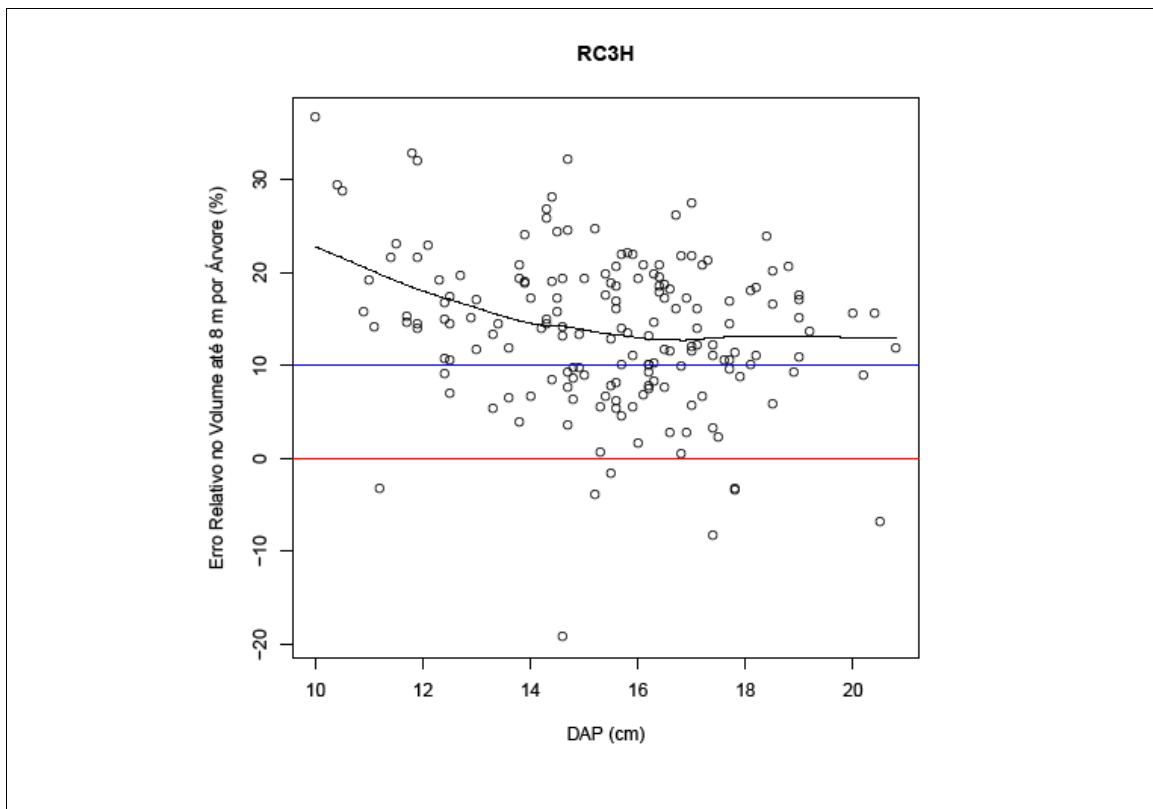


Figura 3.9 - Erro relativo no volume (%) até 8 m de altura em relação ao DAP (cm) das árvores para o Criterion e para o RC3H.

O erro relativo no volume total (%) calculado com o fator de forma apresentou comportamento semelhante ao erro relativo até 8 m de altura para o Criterion, sendo este, em torno dos 10% (Figura 3.10). Resultado este que demonstra que a utilização do fator de forma individual teve boa aplicação. Em contrapartida, o erro relativo no volume total (%) do RC3H foi próximo dos 40% para o volume total das árvores. Desta forma, sabe-se que o dendrômetro que apresentou maior precisão no volume total das árvores foi o Criterion, devido o erro médio de suas medidas.

Parkey e Matney (1998) também obtiveram as melhores estimativas com o Criterion 400, tanto para o diâmetro, altura e volume, quando comparado com o Pentaprisma de Wheeler e o Telerelascópio. Com o Criterion encontraram as menores variações volumétricas médias, cerca de 3,0%, para o Pentaprisma de Wheeler de 8,9%, ambas subestimadas, e por fim, valores superestimados para o Telerelascópio de 6,3%.

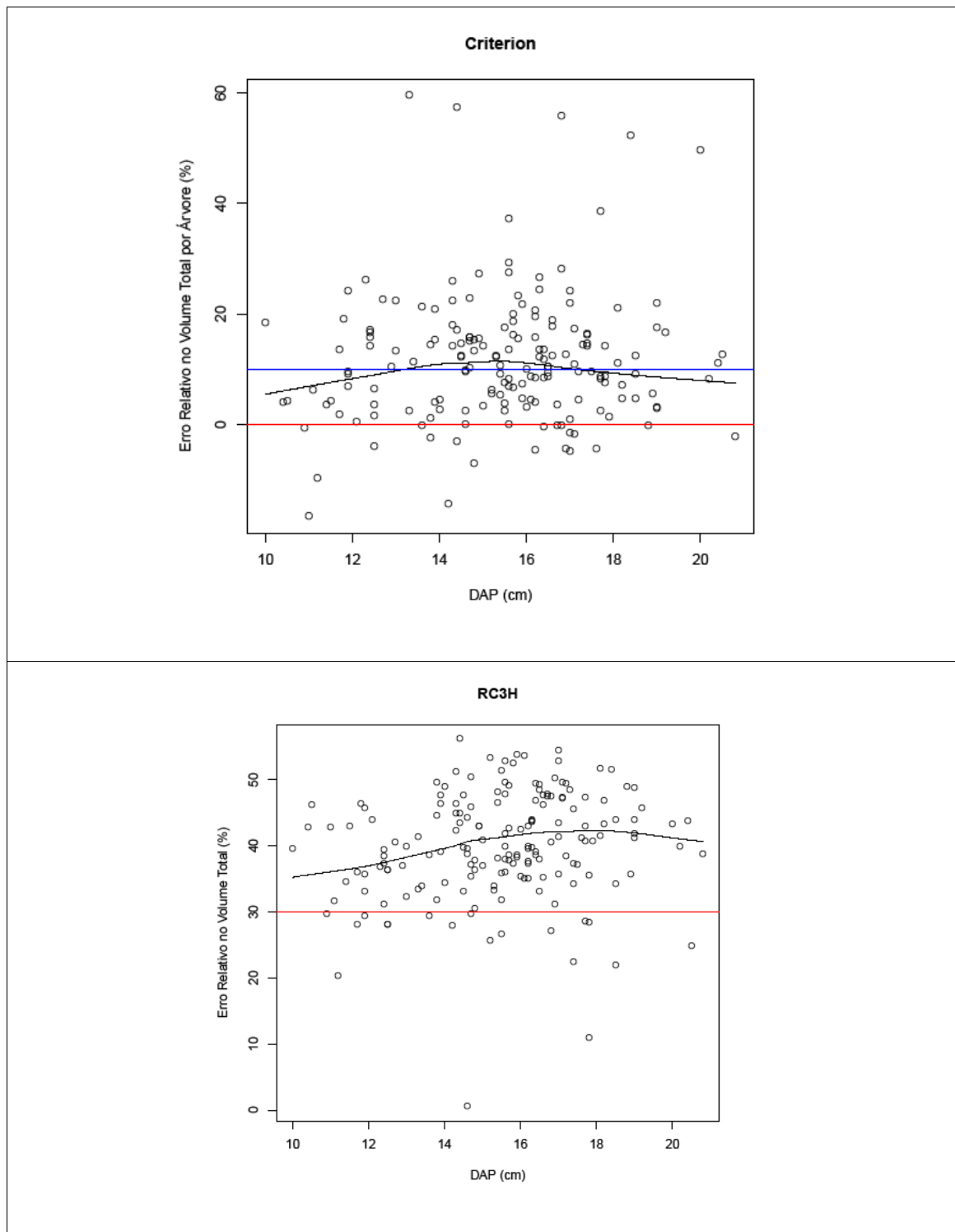


Figura 3. 10 - Erro relativo no volume total das árvores (%) em função do DAP (cm) para os dendrômetros analisados.

### 3.3.4 Erro no volume da parcela



Por meio das simulações obtidas do método *Bootstrap* para a análise do comportamento do erro do volume total ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) observou-se grande diferença entre os métodos analisados (Figura 3.11).

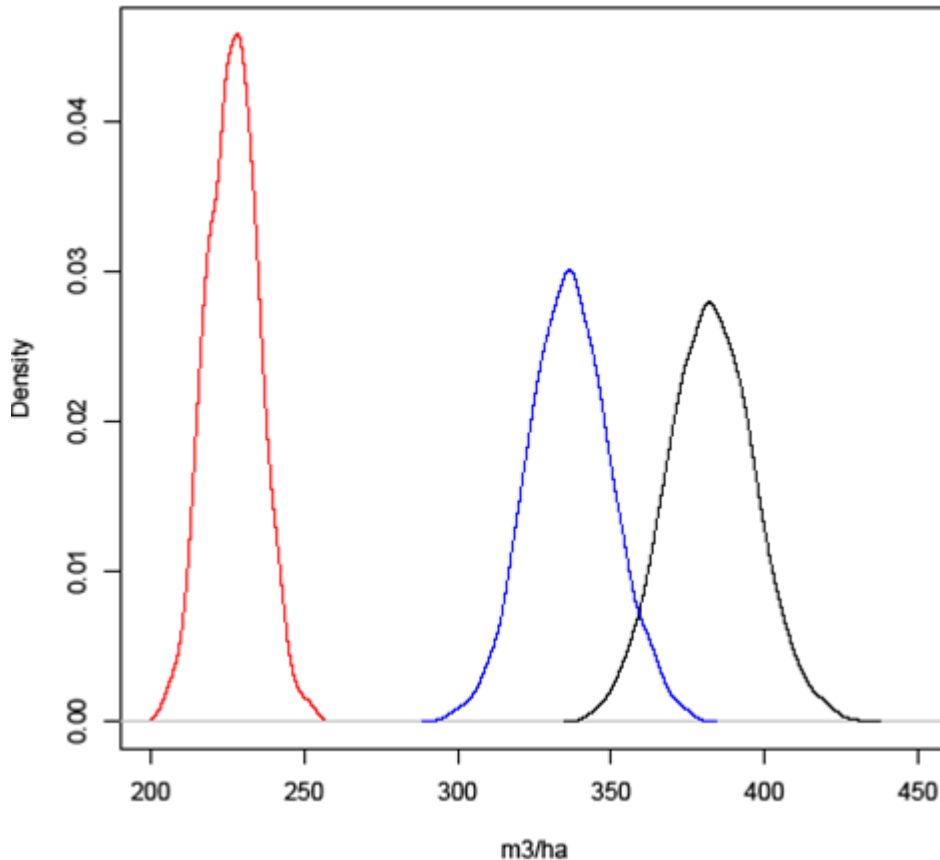


Figura 3.11 - Curvas obtidas por meio das simulações do método *Bootstrap* representando o volume ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ), fornecidos pela cubagem rigorosa (preto), pelas medidas não destrutivas do dendrômetro Criterion (azul) e do RC3H (vermelho).

Através da cubagem rigorosa tradicional obteve-se por meio das simulações um intervalo do volume por hectare de aproximadamente 350 a 420  $\text{m}^3/\text{ha}$ . Já, as simulações com as medidas obtidas de forma não destrutiva pelos dois dendrômetros ópticos apresentaram volumes por hectare subestimados. O volume por hectare obtido com as variáveis do Criterion pelas simulações apresentou estimativas mais próximas das reais, da cubagem rigorosa, variando de aproximadamente 300 a 370  $\text{m}^3/\text{ha}$ . Por fim, as simulações com os dados do RC3H demonstraram uma subestimada acentuada em relação às da cubagem tradicional, variando em média de 200 a 250  $\text{m}^3/\text{ha}$ . Deste modo, sabe-se que o Criterion representou melhor as estimativas de forma não destrutiva em relação ao volume por hectare verdadeiro deste

povoamento. Kalliovirta et al (2005) testando outro dendrômetro óptico, o Relascópio a Laser, para determinar o volume por hectare obtiveram uma superestimativa de em média 2,2 m<sup>3</sup>/ha (1,4%) no volume e um erro padrão de 4,5 m<sup>3</sup>/ha (2,8%). Concluindo que esse erro foi dependente da área basal das plantas e com estimativas volumétricas precisas.

Sabe-se que o erro amostral aceitável em um inventário florestal deve ser menor que 10% em relação ao valor da média e do total estimado. Assim, considerando o intervalo volumétrico fornecido por meio da cubagem destrutiva com erro menor de 10%, tem-se a variação de 315 a 385 m<sup>3</sup>/ha. Resultado este muito próximo ao intervalo volumétrico com o Criterion de 300 a 370 m<sup>3</sup>/ha. Desta forma, percebe-se que o Criterion fornece as medidas consideradas mais exatas do que o RC3H. Enquanto o dendrômetro Criterion determina o volume por hectare sob um erro amostral aproximado de 15 % o RC3H ultrapassa dos 40% de erro amostral.

### **3.4 Resumo dos resultados**

Por meio do comportamento dos erros das medições realizadas pelos dois dendrômetros nas parcelas de *E. grandis*, pode-se dizer que houve uma grande variação da amplitude dos erros quanto a exatidão.

O erro absoluto do diâmetro para o Criterion demonstrou comportamento constante quanto o aumento da posição do fuste, apresentando um erro médio subestimado de aproximadamente 1 cm e erro relativo médio em torno de 5%. Logo, com o RC3H o erro foi crescente com o aumento da posição do tronco, chegando a ser subestimado em média 5 cm para as posições mais elevadas do tronco. O erro relativo também apresentou esta tendência, sendo que para as medidas até 2 m no fuste o erro foi superestimado. A partir dos 3 m de altura no fuste, o erro passou a ser subestimado, chegando em média a 40% aos 8 m do tronco.

Quando comparado em relação ao DAP das árvores, o erro relativo apresentou uma distribuição distinta para os dois dendrômetros. Sendo o Criterion aquele que teve uma distribuição mais uniforme dos erros com o aumento do diâmetro a altura do peito das plantas.

Para o volume da seção e acumulado observou-se comportamentos distintos entre os aparelhos estudados. O Criterion manteve erros praticamente constantes e subestimados, enquanto o RC3H, teve erros superestimados até determinada altura no tronco e depois passaram a serem subestimados com o aumento da posição do tronco.

As estimativas volumétricas por árvore mais precisas foram obtidas com o Criterion. Sendo que, este manteve um erro médio subestimado em torno dos 10%, enquanto que o RC3H teve erro superior aos 30% em média.

O erro volumétrico por hectare segundo as simulações Bootstrap verificou-se que ambos os dendrômetros, Criterion e RC3H, resultaram em estimativas subestimadas no volume por hectare. Sendo que o Criterion, apresentou novamente as estimativas mais exatas quando comparados as observadas pela cubagem rigorosa.

### 3.5 Conclusão

Diante dos resultados obtidos com os dois dendrômetros ópticos pode-se concluir que o Criterion é aquele que fornece as melhores estimativas, tanto para o diâmetro do fuste quanto para o volume da árvore e por hectare. Uma vantagem que o coloca a frente do RC3H foi que o mesmo foi capaz de medir os diâmetros ao longo do fuste sem auxílio de vara graduada para delimitar a altura pré-definida. Outro fator foi que o Criterion pode medir diâmetros em alturas superiores ao RC3H. Enquanto este se limitou nas medições até os 8 metros de altura na árvore com erros já próximos aos 40% no diâmetro ao longo do fuste, 30% no volume por árvore e aproximadamente 40% para o volume por hectare. Logo, o Criterion apresentou em todos os casos medidas mais exatas, em torno de 10% para o diâmetro e para o volume da árvore, e aproximadamente 15% para o volume por hectare, quando comparadas a cubagem rigorosa. Portanto, sabendo que o erro amostral considerado em um inventário florestal geralmente deve ser menor que 10%, o Criterion sob forma não destrutiva, forneceu boas estimativas com pouca diferença de erro.

### Referências

CASTRO, T. N.; MONTEIRO, D.R.; BATISTA, J.L.F. Avaliação do aparelho Criterion 400 na cubagem rigorosa de árvores em pé. In: 16º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo, 2008, Piracicaba/SP. *Anais...*, 2008.

CLARK, N.A.; WYNNE, R.H.; SCHMOLDT, D.L. A review of past research on dendrometers. *Forest Science*. Washington, v.46, n.4, p570-576. 2000.

COUTO, H.T.Z.; BASTOS, N.L.M. "Erros na medição de altura em povoamentos de *Eucalyptus* em região planta". **IPEF**, Piracicaba, n. 39, p. 21-31, 1988.

COUTO, H.T.Z.; BATISTA, J.L.F.; RODRIGUES, L.C.E. "Mensuração e gerenciamento de pequenas florestas". **Documentos florestais**, Piracicaba, n. 5, p. 1-37, 1989.

FERGUSON, I.S.; O'HARA, A.J.O.; WOOD, G.B.; MILES, J.A. Calibrating dendrometers for estimating tree volumes. **Australian Forest Research**. Canberra. v.14, p.253-263. 2000.

FREITAS, A.G.; WICHERT, M.C.P. Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o Criterion 400. **IPEF, Circular Técnica**, nº 188, Piracicaba, p.1-7, 1998.

LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. Uso do método da altura relativa em inventário florestal de um povoamento de pinus. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.865-873, 2004.

LIU, C.J.; HUANG, X.; EICHEMBERGER, J.K. **Using laser technology for measuring trees**. Paper present at Modern Methods of estimating tree and log volume and increment conference and workshop (IUFRO S4.02). June 14-16, West Virginia University, Morgantown, WV, USA. 1993. 13p.

KALLIOVIRTA, J.; LAASASENAHO, J.; KANGAS, A. Evaluation of the Laser-relascope. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v.20, p.181-194, 2005.

MACHADO, S.A. e FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2006. 316 p.

PARKEY, R.C.; MARTNEY, T.G. Comparison of Optical Dendrometers for Prediction of Standing Tree Volume. **Southern Journal of Applied Forestry**. Oklahoma, v.23, n.2, p. 407-417, 1998.

WILLIAMS, M.S.; CORMIER, K.L.; BRIGGS, R.G.; MARTINEZ, D.R. Evaluation of the Barr & Stroud FP15 and Criterion 400 Laser Dendrometers for Measuring Upper Stem Diameters and Heights. **Forest Science**. Washington, v.45, n.1, p. 53-61. 1999.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>. Acesso em 27 de julho de 2011.



## 4 DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL POR UMA METODOLOGIA NÃO-DESTRUTIVA ATRAVÉS DE DENDRÔMETROS ÓPTICOS

### Resumo

As plantações florestais são consideradas reservatórios de biomassa vegetal e são muitas vezes apontadas como alternativas para redução de gases do efeito estufa (CO<sub>2</sub>) por meio do acúmulo deste material em seus tecidos durante seu desenvolvimento. Assim, o objetivo deste trabalho foi aprimorar os métodos existentes para determinação da biomassa do tronco sob forma não destrutiva, e verificar a influência que os dendrômetros a laser exercem sobre a predição pelos modelos empíricos existentes no meio florestal a nível de árvores individuais. Este foi desenvolvido na Estação Experimental de Ciências Florestais, em Itatinga/SP, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) em três parcelas de um plantio de *Eucalyptus grandis*, totalizando 175 árvores. O diâmetro do fuste das árvores em pé foi mensurado com os dois dendrômetros, Criterion e RC3H, nas distâncias de 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3; 2,0 m e a partir deste de metro em metro ao longo do tronco até os 8 m de altura. Após a cubagem em pé foram derrubadas as árvores e obtido o diâmetro com uma suta e trena nas mesmas posições em que se realizou a cubagem não destrutiva. Discos de madeira de aproximadamente 5 cm de espessura nas posições de 0, DAP, 50 e 100% da altura total foram retirados e secos para determinação da umidade. A determinação da biomassa foi realizada através da técnica gravimétrica e da volumétrica por meio de três métodos diferentes (cubagem rigorosa tradicional, Criterion e RC3H). Foram testados sete modelos com a técnica gravimétrica e três com a volumétrica para a predição da biomassa. Os critérios de seleção dos modelos empíricos foram o coeficiente de determinação, o erro padrão, o coeficiente de variação e o valor do critério de informação Akaike. De modo geral, todos os modelos apresentaram bons ajustes, entretanto, selecionou-se apenas o modelo de Schumacker-Hall para a técnica volumétrica e com os dados do RC3H ( $\ln b = -3,4674 + 2,0234 \cdot \ln(d) + 0,6964 \cdot \ln(h)$ ). O modelo de Spurr com a técnica gravimétrica ( $\ln b = -3,8421 + 0,9976 \cdot \ln(d^2h)$ ) e através da volumétrica para os dados da cubagem rigorosa ( $\ln b = -3,9193 + 1,0069 \cdot \ln(d^2h)$ ) e com o Criterion ( $\ln b = -3,7655 + 0,9736 \cdot \ln(d^2h)$ ). O erro padrão da predição médio para estes modelos foram superestimados em 1% com a cubagem rigorosa tradicional e subestimados em aproximadamente de 11% para o Criterion e 40% para o RC3H. Portanto, pode-se dizer que a aplicação destes dendrômetros para predição da biomassa do fuste pode fornecer valores pouco confiáveis.

Palavras-chave: Quantificação de Biomassa; Criterion; RC3H da Masser; Modelos empíricos

### Abstract

Forest plantations are considered biomass reservoirs and are often cited as alternatives for reducing greenhouse gases (CO<sub>2</sub>) through the accumulation of this material in their plant tissues during development. The objective of this study was to improve existing methods for determination of biomass of stem non-destructive way, and verify the influence that laser

dendrometers exercise on the prediction by existing empirical models in forest environment on the level of individual trees. This study was developed at the Experimental Station of Forest Sciences, in Itatinga / SP, of the University of São Paulo (ESALQ / USP) in three plots of a plantation of *Eucalyptus grandis*, totaling 175 trees. The stem diameter of standing trees was measured with the two dendrometers, Criterion and RC3H, at distances of 0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 2.0 meters from this point meter by meter along the stem up to 8 meters height. After the cubing standing trees they were felled and the diameter obtained with a caliper and a tape in the same positions in which the non-destructive measures were taken. Wood disks with approximately 5 cm of thickness at the positions 0, DHB, 50 and 100% of the total height were removed and dried for determination of humidity. The determination of biomass was performed by volumetric and gravimetric technique using three different methods (traditional real cubic, Criterion and RC3H). Were tested seven models with the gravimetric technique and three with the volume for predicting of biomass. The selection criterions of empirical models were the coefficient of determination, standard error, coefficient of variation and the value of criterion of Akaike information. In general all models showed good adjustment, however, were selected only the Schumacker-Hall model for the volumetric technique and with the RC3H's data ( $\ln b = -3.4674 + 2.0234 \cdot \ln(d) + 0.6964 \cdot \ln(h)$ ). Spurr's model with the gravimetric technique ( $\ln b = -3.8421 + 0.9976 \cdot \ln(d^2h)$ ) and through the volumetric for the data of the traditional real cubic ( $\ln b = -3.9193 + 1.0069 \cdot \ln(d^2h)$ ) and with the Criterion ( $\ln b = -3.7655 + 0.9736 \cdot \ln(d^2h)$ ). The standard error average of prediction for these models were overestimated in 1% with the traditional real cubic volume and underestimated in approximately 11% to the Criterion and 40% to the RC3H. Therefore, it can be said that the application of these dendrometers for predicting of stem biomass can provide unreliable values.

Keywords: Biomass; Criterion; RC3H of Masser; Empirical models

#### 4.1 Introdução

Devido à importância das florestas no cenário das mudanças climáticas, tem aumentado a demanda por pesquisas que quantifiquem o potencial dos ecossistemas florestais em sequestrar carbono da atmosfera (MELO; DURIGAN, 2006). Para efeito de clima é extremamente importante que se realize as estimativas de biomassa florestal, pois está diretamente relacionada com os estoques de carbono que, por sua vez, são utilizados para quantificar o gás carbônico liberado na atmosfera durante o processo de degradação florestal (HIGUCHI et al., 1998).

Atualmente, tem-se utilizado, também, a produção de biomassa, já que o conhecimento desta nos diversos ecossistemas tem assumido papel importante para todo um vasto conjunto de aspectos como comercialização de produtos, estudos da produtividade do sistema florestal, estudos de fluxos de energia e de nutrientes e estudos da contribuição dos ecossistemas para o ciclo global do carbono (SOARES; LEITE; GORGENS, 2005). Desta forma, quanto maior a

precisão da estimativa de biomassa, maior será a consistência da quantificação de carbono estocado e/ou liberado na atmosfera pelos ecossistemas florestais (SANQUETTA, 2002).

As metodologias utilizadas para quantificação de biomassa florestal dividem-se em métodos diretos (destrutivos) e métodos indiretos (não destrutivos). Os diretos significam uma medição real feita diretamente da biomassa, por exemplo, a pesagem de um fuste inteiro por meio de um dinamômetro ou uma balança. Todas as árvores de uma determinada parcela são derrubadas e pesadas, sendo feita em seguida a extrapolação da avaliação amostrada para a área total de interesse. A predição de biomassa aérea pelo método indireto consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal. As estimativas podem ser feitas por meio de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões de dados provenientes de inventários florestais (dap, altura e volume) ou por dados de sensoriamento remoto (imagens de satélite) (HIGUSHI e CARVALHO JR, 1994).

Estes dois métodos ainda são bastante discutidos entre os autores, os quais dividem suas opiniões sobre qual a melhor forma de se estimar a biomassa. A literatura mostra que há diferenças nas estimativas até quando se usa o mesmo banco de dados. O único consenso é que é impossível determinar a biomassa de cada árvore pelo método direto. Por isso é necessário realizar as análises de regressão para gerar modelos estatísticos que possam ser aplicados para estimar biomassa em regiões maiores (FEARNSIDE, LEAL FILHO, FERNANDES, 1993; HIGUCHI et al., 1998).

Segundo Nelson et al. (1999), é possível melhorar as estimativas de carbono sequestrado por florestas utilizando equações empíricas preexistentes na literatura. Porém, estas equações precisam ser aplicadas corretamente, considerando, por exemplo, o mesmo tipo de floresta de onde foram originadas e parâmetros biométricos dentro do intervalo daqueles usados para desenvolver a equação (amplitude de DAP e altura). O estudo mostrou que quando critérios como estes não são respeitados, as estimativas de biomassa por equações empíricas podem gerar erros de até 60% em relação ao valor esperado.

Desta forma, visando aprimorar as estimativas de biomassa florestal por métodos não destrutivos e percebendo que existem no mercado inúmeros dendrômetros ópticos capazes de cubar as árvores em pé, objetivou-se neste trabalho verificar a acurácia de dois dendrômetros ópticos na cubagem de árvores por métodos não destrutivos e sua influência na predição da biomassa florestal por meio de modelos estocásticos disponíveis na literatura florestal.



## 4.2 Material e Métodos

### 4.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (Figura 4.1) do Departamento de Ciências Florestais da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Localizada na região centro sul do Estado de São Paulo, a  $23^{\circ} 10' S$  e  $48^{\circ} 40' W$ , com 857 metros de altitude média. O clima da região segundo Köeppen é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), com precipitação anual média de 1308 mm. A temperatura média do mês mais frio  $12,8^{\circ}C$  e a média do mês mais quente de  $19,4^{\circ}C$ .

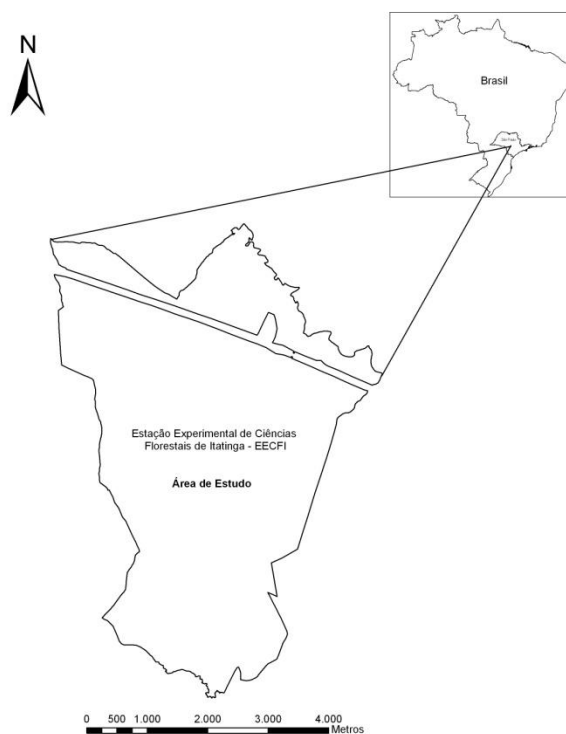


Figura 4.1- Áreas da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga/SP.

O experimento foi realizado em um povoamento de *Eucalyptus grandis* Maiden com 13 anos de idade e espaçamento 3 x 2 m. As medições foram feitas em três unidades amostrais de 360 m<sup>2</sup> cada, sendo que cada parcela possuía em média, 60 árvores. Desta forma, foram mensuradas um total de 175 árvores no povoamento de eucalipto. Um resumo dos dados encontrados nas três parcelas encontra-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resumo dos dados de dap, altura total e volume total por árvore para as três parcelas do povoamento de *Eucalyptus grandis*. Sendo que mín. e máx. representam o valor mínimo e máximo da variável de interesse observada na respectiva parcela.

| Parcela | dap (cm) |       |      | h (m) |       |      | v (m <sup>3</sup> ) |       |       |
|---------|----------|-------|------|-------|-------|------|---------------------|-------|-------|
|         | mín.     | médio | máx. | mín.  | médio | máx. | mín.                | médio | máx.  |
| 1       | 10,0     | 15,9  | 20,8 | 15,7  | 25,3  | 28,4 | 0,053               | 0,246 | 0,458 |
| 2       | 10,4     | 15,3  | 20,4 | 19,4  | 24,9  | 28,6 | 0,079               | 0,226 | 0,439 |
| 3       | 10,9     | 15,2  | 19,0 | 19,0  | 24,8  | 28,5 | 0,093               | 0,219 | 0,367 |

| Parcela | Umidade (%) |       |      | Biomassa (kg) |       |       |
|---------|-------------|-------|------|---------------|-------|-------|
|         | mín.        | médio | máx. | mín.          | médio | máx.  |
| 1       | 34,9        | 45,8  | 51,1 | 30,4          | 151,8 | 285,3 |
| 2       | 41,1        | 47,5  | 59,1 | 43,7          | 123,5 | 247,8 |
| 3       | 22,2        | 46,5  | 52,3 | 47,3          | 128,9 | 213,1 |

#### 4.2.2 Descrição dos dendrômetros

Foram utilizados para determinação da biomassa sob forma não destrutiva dois dendrômetros de medição à laser. Os diâmetros em diferentes alturas foram mensurados através do Criterion 400 e do RC3H da Savcor, como demonstra sua descrição abaixo.

##### a) Criterion 400

O Criterion modelo 400 considerado por LIU et al. (1993) como a versão digital do Relascópio de Bitterlich, pode ser usado para medir diâmetro a qualquer altura, alturas das árvores, classe de forma, área basal do povoamento, inclinação do terreno em graus e em porcentagem, distâncias horizontais e inclinadas, ângulos horizontais e coordenadas para levantamentos topográficos, apresentados por um mostrador digital.

##### b) RC3H

O RC3H é um dendrômetro digital da Savcor Masser que possui um holograma especial para maior exatidão na contagem eletrônica de ângulos exatos. Corrige automaticamente a inclinação do terreno, impermeável e possibilita a medição de altura das árvores, inclinação, volume, distância horizontal e diâmetros em diferentes alturas.

### 4.2.3 Cubagem rigorosa

As medidas dos diâmetros a diferentes alturas foram tomadas a 0,1 m; 0,4 m; 0,7 m; 1,0 m; 1,3 m; 2,0 m e em intervalos de 1,0 m até a altura de 8,0 m, totalizando doze diâmetros por indivíduo. Este procedimento foi feito com os dendrômetros Criterion 400 e RC3H, sob forma não destrutiva. Para medir os diferentes diâmetros com o RC3H usava-se a vara telescópica para delimitar a altura desejada.

Depois de mensurados os diâmetros com os dois dendrômetros com os indivíduos em pé e numerados com placa metálica, derrubou-se as árvores com motosserra.

A cubagem rigorosa foi realizada com auxílio de uma trena e suta. Foram marcadas as mesmas medidas ao longo do fuste quando cubadas ainda em pé e a altura total. Após os 8,0 m seguiram-se intervalos de 1,0 m nas seções do tronco até que o diâmetro fosse menor que 5,0 cm. Para os diâmetros obtidos com a suta, foram feitas duas medidas em cada diâmetro, uma 90° em relação à outra e obtida à média. Os dados foram coletados utilizando o coletor eletrônico WRC da Masser.

### 4.2.4 Volume das árvores

O volume individual das árvores foi calculado pela fórmula de Smalian conforme MACHADO e FIGUEIREDO FILHO (2006). Desta forma, obteve-se o volume pelos três métodos, com o Criterion 400, com o RC3H e o volume considerado verdadeiro através da cubagem rigorosa. Para obter o volume a partir dos 8,0 m pelo Criterion 400 e pelo RC3H usou-se o fator de forma calculado da seguinte forma:

$$f_i = \frac{v.ponta_i}{\left(\frac{\pi * d_{8i}^2}{40000}\right) * (ht_i - 8)} \quad (5)$$

Onde:

$i$  = é o índice que se refere às árvores;

$v.ponta_i$  = é a diferença entre o volume rigoroso total da árvore ( $m^3$ ) e o volume rigoroso até 8,0 m da árvore ( $m^3$ );

$d_{8i}$  = diâmetro à 8,0 m de altura da cubagem rigorosa da árvore (cm);

$ht_i$  = altura total da árvore da árvore (m).

Assim, os volumes a partir de 8,0 m até a altura total para os métodos do Criterion 400 e RC3H foram obtidos:

$$vp_i = \frac{\pi * d_{8i}^2}{40000} * (ht_i - 8) * f_i \quad (6)$$

Onde:

$i$  = é o índice que se refere às árvores;

$d_{8i}$  = diâmetro à 8,0 m de altura da cubagem rigorosa da árvore (cm);

$ht_i$  = altura total da árvore (m);

$f_i$  = fator de forma da árvore.

Logo, os volumes totais pelo Criterion 400 e RC3H foram obtidos pela soma dos volumes das seções até 8,0 m de altura e pelo volume da ponta (vp).

#### 4.2.5 Discos de madeira amostrados do tronco

Os discos amostrais com casca foram tomados de cada indivíduo em quatro posições relativas referentes a altura total da árvore: a 0% (disco da base), altura do DAP, 50% e 100% da altura total, sendo que o último disco foi extraído quando o diâmetro do fuste fosse menor que 5 cm. Os discos foram pesados após o corte no campo, para determinação do peso úmido ( $Mu$ ), em balança analítica com precisão de um grama.

#### 4.2.6 Determinação do teor de umidade

Os discos foram utilizados como amostras de madeira para determinação do teor de umidade de cada árvore em laboratório. Para determinação do teor de umidade, os discos amostrais foram secos em estufa de circulação forçada de ar a  $103 \pm 2^\circ C$  até peso constante ( $Ms$ ). Após a secagem, o teor de umidade das amostras ( $U$ ) foi determinado pela seguinte fórmula:

$$U_i = \frac{(Mu - Ms)}{Mu} 100 \quad (7)$$

Em que:

$i$  é o índice que se refere às árvores;

$U$  é o teor de umidade das amostras (%);

$Mu$  é a massa úmida das amostras (kg);

$Ms$  é a massa seca das amostras (kg).

#### 4.2.7 Determinação da biomassa

A determinação da biomassa deu-se através de duas técnicas comumente utilizadas para obtenção da biomassa aérea das árvores individuais: a técnica gravimétrica e a técnica volumétrica. A descrição de como as duas técnicas foi aplicada no trabalho é apresentada a seguir.

##### a) Técnica gravimétrica

A massa verde do tronco foi medida com auxílio de uma balança analítica, com as toras seccionadas no campo. A biomassa foi obtida da seguinte forma:

$$b_{gi} = m_i \left( 1 - \frac{u_i}{100} \right) \quad (8)$$

Onde:

$i$  é o índice que se refere às árvores;

$b_g$  é a biomassa do tronco pela técnica gravimétrica (kg);

$m$  é a massa verde do tronco (kg);

$u$  é o teor de umidade do tronco (%).

##### b) Técnica volumétrica

Após obter o volume sólido das árvores por meio da cubagem rigorosa com o método de Smalian, a biomassa do tronco foi obtida através da Fórmula 9.

$$b_{vi} = v_i \cdot d \quad (9)$$

Onde:

$i$  é o índice que se refere às árvores;

$b_v$  é a biomassa do tronco pela técnica volumétrica (kg);

$v$  é o volume do tronco obtido pela cubagem ( $m^3$ );

$d$  é a densidade básica média da espécie entre todos os indivíduos amostrados,  $0,5724 \text{ g.cm}^{-3}$ .

#### 4.2.8 Modelos de predição de biomassa do tronco sob a técnica gravimétrica

Alguns modelos foram selecionados da literatura para testar o ajuste da biomassa do fuste pela técnica gravimétrica (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Modelos empíricos para determinação da biomassa através da técnica gravimétrica.

| <b>Equação</b> | <b>Modelo Empírico</b>  | <b>Autores</b>     |
|----------------|---|--------------------|
| 1              | $\ln b = b_0 + b_1 \cdot \ln (d^2h)$  | Spurr              |
| 2              | $b = b_0 + b_1 \cdot (d^2h)$  | Brown              |
| 3              | $b = b_0 + b_1 \cdot d^2 + b_2 \cdot d^2h + b_3h$                                     | Stoate             |
| 4              | $b = b_0 + b_1d + b_2 \cdot d^2 + b_3 \cdot dh + b_4 \cdot d^2 \cdot h + b_5 \cdot h$ | Meyer              |
| 5              | $b = b_0 + b_1 \cdot d^2 + b_2 \cdot d^2 \cdot h + b_3 \cdot dh^2 + b_4h^2$           | Naslund modificada |
| 6              | $\ln b = b_0 + b_1 \ln(d) + b_2 \ln(h)$   | Schumacher-Hall    |
| 7              | $\ln b = b_0 + b_1 \ln (1/d)$   | Schumacher         |

Sendo que:  $b$  é a biomassa (kg);  $d$  é o diâmetro à 1,30 m das árvores (cm);  $h$  é a altura total (m) e  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  e  $b_4$  são os coeficientes da regressão.

No caso dos modelos com ajustes logarítmicos, ocorre uma discrepância devido à transformação matemática, ao se efetuar a operação inversa para se obter a variável de interesse. A correção para essa discrepância foi feita multiplicando-se a variável dependente encontrada pelo Fator de Correção de Meyer (MACHADO et al., 2008).

#### 4.2.9 Modelos de predição de biomassa do tronco sob a técnica volumétrica

Para a técnica volumétrica foi ajustado apenas três modelos, sendo que esses foram os que tiveram o melhor ajuste pela técnica gravimétrica, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Modelos empíricos para determinação da biomassa por meio da técnica volumétrica.

| <b>Equação</b> | <b>Modelo Empírico</b>                  | <b>Autores</b>  |
|----------------|---|-----------------|
| 1              | $\ln b = b_0 + b_1 \cdot \ln (d^2h)$    | Spurr           |
| 2              | $\ln b = b_0 + b_1 \ln(d) + b_2 \ln(h)$ | Schumacher-Hall |
| 3              | $\ln b = b_0 + b_1 \ln (1/d)$           | Schumacher      |

Sendo que:  $b$  é a biomassa (kg);  $d$  é o diâmetro à 1,30 m das árvores (cm);  $h$  é a altura total (m) e  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  são os coeficientes da regressão.

#### 4.2.10 Ajuste e Avaliação dos modelos de predição

Para selecionar o melhor modelo empírico para as diferentes técnicas de determinação da biomassa utilizaram-se os seguintes critérios:

**a) Critério de Informação Akaike (AIC)**

O AIC é uma metodologia simples e efetiva para seleção de modelos para análise de dados empíricos que analisa através da relação da distância entre os dois modelos, chamada de Kulbach-Leibler, e a função de máxima log-verossimilhança de Fisher (AKAIKE, 1973 *apud* BURNHAM e ANDERSON, 2002). Este critério estima a discrepância geral relativa entre um modelo de aproximação e o modelo real (hipotético) que gerou os dados. Desta forma, quanto menor o valor do AIC de um modelo, menor sua discrepância geral estimada e, por consequência, menor sua distância relativa para o modelo real (hipotético). A fórmula para o cálculo do AIC é:

$$AIC = -2 \ln (mv) + 2 p \quad (10)$$

Onde:

$mv$  é o valor de maior máxima verossimilhança apresentada pelo modelo;

$p$  é o número de parâmetros.

**b) Coeficiente de Determinação Ajustado ( $R^2_{aj.}$ )**

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) expressa a quantidade de variação total explicada pela regressão (HESS, 2009). Como o coeficiente de determinação cresce à medida que se inclui uma nova variável ao modelo matemático, foi utilizado o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ) que pondera o número de coeficientes da equação, obtido pela fórmula a seguir:

$$R^2_{aj.} = R^2 - \left( \frac{p-1}{n-p} \right) \cdot (1 - R^2) \quad (11)$$

Sendo:

$R^2$  = coeficiente de determinação;

$p$  = número de coeficientes da equação (parâmetros);

$n$  = número de observações.

Quanto mais próximo de 1 forem os valores dos coeficientes de determinação melhor será o ajuste da linha de regressão. Sendo assim, por este critério, selecionado o modelo matemático que apresentou o maior valor de  $R^2_{Aj.}$ .

**c) Erro Padrão da Estimativa ( $S_{yx}$ )**

O erro padrão da estimativa também foi utilizado como critério na seleção dos modelos, segundo a equação abaixo.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n-p}} \quad (12)$$

Onde:

$S_{yx}$  = erro padrão da estimativa na unidade da variável resposta;

$\hat{Y}$  é a variável regressora estimada pelo modelo;

$Y$  é a variável observada;

$n$  = número de observações;

$p$  = número de parâmetros.

Assim, quanto menor for o erro padrão da estimativa melhor são as estimativas obtidas na equação, portanto deveria ser selecionada.

**d) Coeficiente de variação**

O Coeficiente de Variação (CV%) é obtido pela fórmula:

$$CV \% = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (13)$$

Sendo:

$S_{yx}$  = erro padrão da estimativa;

CV % = coeficiente de variação em percentagem;

$y$  = média aritmética da variável dependente.

Dessa forma, foi selecionado o modelo matemático que apresentou o menor valor de CV%.

**e) Análise Gráfica do Erro de Predição Relativo**



Analisaram-se os gráficos dos resíduos existentes na predição da biomassa do fuste por meio da técnica volumétrica e através do ajuste dos melhores modelos. A biomassa obtida com a técnica gravimétrica foi aquela considerada verdadeira. Assim, os diferentes métodos de cubagem não destrutivos, os provenientes do RC3H e com o Criterion, puderam ser confrontados. Com a diferença entre a biomassa da técnica gravimétrica e com os métodos não destrutivos, seja pela predição dos modelos ou da técnica volumétrica, foi possível avaliar a magnitude do erro na predição da biomassa das árvores.

### 4.3 Resultados e Discussão

#### 4.3.1 Análise descritiva das variáveis utilizadas para a predição

As estatísticas descritivas das variáveis dependentes utilizadas no ajuste dos modelos são descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Estatísticas descritivas das variáveis dependentes utilizadas na construção dos modelos para prever a biomassa do tronco.

| Técnica      | Método              | Biomassa (kg) |       |       |      |       |
|--------------|---------------------|---------------|-------|-------|------|-------|
|              |                     | Mín.          | Média | Máx.  | s    | CV(%) |
| Volumétrica  | Cubagem tradicional | 30,4          | 131,6 | 262,2 | 46,3 | 35,17 |
|              | Criterion           | 24,8          | 115,8 | 268,0 | 43,4 | 37,45 |
|              | Masser              | 18,4          | 78,1  | 180,6 | 28,1 | 35,93 |
| Predição     | Cubagem tradicional | 32,8          | 131,4 | 252,1 | 45,3 | 34,47 |
|              | Criterion           | 29,9          | 114,3 | 215,2 | 38,2 | 33,44 |
|              | Masser              | 22,4          | 77,5  | 145,3 | 25,3 | 32,69 |
| Gravimétrica | -                   | 30,4          | 131,5 | 285,3 | 46,9 | 35,64 |

Sendo que, Mín é o valor mínimo, Máx é o valor máximo, s é o desvio padrão e CV é o coeficiente de variação das observações.

Diante das estatísticas descritivas da biomassa do fuste por meio das diferentes técnicas, pode-se perceber que independente da técnica utilizada, seja volumétrica ou com a predição da mesma, a biomassa obteve estimativas semelhantes. Comparando a técnica gravimétrica, considera a mais exata na determinação da biomassa, com as outras estimativas, nota-se que a cubagem tradicional independente da técnica fornece valores muito próximos aos considerados

reais. Logo, aquelas com o Criterion e com o Masser forneceram estimativas subestimadas desta variável. Aquelas com o Criterion foram mais exatas do que as com o Masser. Através do comportamento do desvio padrão da estimativa pode-se dizer que as menores variações foram apresentadas através do método utilizando o dendrômetro da Masser. Estas indicam provavelmente que, este fornece estimativas precisas, porém, não exatas. O coeficiente de variação teve comportamento praticamente constante entre as diferentes técnicas testadas, variando de 32,69 até 37,45%.

#### 4.3.2 Critérios de seleção dos modelos ajustados por meio da técnica gravimétrica

Os critérios de seleção dos modelos estudados através da técnica gravimétrica podem ser visualizados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores dos critérios de seleção dos modelos analisados para a Técnica Gravimétrica.

| Modelo | $R^2_{aj.}$ | CV(%) | Erro  | AIC    |
|--------|-------------|-------|-------|--------|
| 1      | 0,9257      | 16,15 | 13,37 | 1344,5 |
| 2      | 0,9033      | 11,09 | 14,57 | 1430,2 |
| 3      | 0,9031      | 11,10 | 14,59 | 1432,4 |
| 4      | 0,9039      | 11,05 | 14,53 | 1432,9 |
| 5      | 0,9030      | 11,10 | 14,59 | 1433,6 |
| 6      | 0,9255      | 16,35 | 13,39 | 1348,8 |
| 7      | 0,8980      | 19,41 | 15,65 | 1081,2 |

Sendo que,  $R^2_{aj.}$  é o coeficiente de determinação ajustado, CV (%) é o coeficiente de variação (%), Erro é o erro padrão da predição encontrado pelo modelo e AIC é o Critério de Informação de Akaike.

Os resultados mostraram que, de modo geral, os modelos apresentaram altos coeficientes de determinação empírico, sendo eles superiores a 0,8980. Os melhores valores encontrados foram para o  $R^2_{aj.}$  foi com a equação de número 1 (0,9257) de Spurr e a equação de número 6 (0,9255) de Schumacker-Hall. Os demais apresentaram valores bem próximos de  $R^2_{aj.}$ , entre 0,8980 e 0,9039. O erro padrão da predição não teve grande variação (13,37 até 15,65) entre os modelos estudados, sendo o de Spurr com o menor valor. Silva et al. (2004) testando diferentes modelos para prever a biomassa do tronco em povoamentos de *Eucalyptus* sp. também encontraram o menor erro padrão para o modelo que utilizou a variável combinada ( $d^2h$ ), como

verificado neste trabalho. Para os valores de AIC o modelo de número 7 foi aquele que demonstrou o melhor ajuste (AIC=1081,2). Quanto menor for o mesmo, melhor será considerado em relação a distância relativa do modelo verdadeiro. O modelo de Spurr, n° 1, (AIC=1344,5) e o de Schumacker-Hall, n° 6, (AIC=1348,8) também tiveram bom ajuste em relação aos demais. Portanto, estes três modelos (n° 1, 6 e 7) possuem grande diferença em relação os demais. Através do AIC nota-se que aqueles que apresentaram a escala logarítmica no ajuste, forneceram as melhores estimativas. Apenas para o coeficiente de variação que estes modelos apresentaram estimativas piores que os demais. Entretanto, a combinação de todos os índices ainda destaca os modelos (n° 1, 6 e 7) como sendo os de explicação a variável predita.

#### 4.3.3 Critérios de seleção dos modelos ajustados através da técnica volumétrica

Através dos critérios de seleção dos modelos abordados, Tabela 4.4, selecionou-se o melhor modelo por meio do ajuste com a técnica volumétrica.

Tabela 4.4 – Valores dos critérios de seleção dos modelos analisados para a Técnica Volumétrica.

| Método    | Modelo | $R^2_{aj.}$ | CV(%)  | Erro   | AIC     |
|-----------|--------|-------------|--------|--------|---------|
| Cubagem   | 1      | 0,9721      | 1,3514 | 0,0659 | -448,37 |
|           | 2      | 0,9721      | 1,3520 | 0,0659 | -447,22 |
|           | 3      | 0,9441      | 1,9133 | 0,0933 | -327,38 |
| Rigorosa  | 1      | 0,8396      | 3,4625 | 0,1645 | -130,21 |
|           | 2      | 0,8394      | 3,4647 | 0,1646 | -129,01 |
|           | 3      | 0,8108      | 3,7611 | 0,1787 | -101,43 |
| Criterion | 1      | 0,8933      | 2,8773 | 0,1254 | -224,75 |
|           | 2      | 0,8942      | 2,8649 | 0,1249 | -225,27 |
|           | 3      | 0,8825      | 3,0198 | 0,1316 | -207,93 |
| Masser    | 1      | 0,8933      | 2,8773 | 0,1254 | -224,75 |
|           | 2      | 0,8942      | 2,8649 | 0,1249 | -225,27 |
|           | 3      | 0,8825      | 3,0198 | 0,1316 | -207,93 |

Sendo que,  $R^2_{aj.}$  é o coeficiente de determinação ajustado, CV é o coeficiente de variação (%), Erro é o erro padrão de predição encontrado pelo modelo e AIC é o Critério de Informação de Akaike.

Os critérios de seleção dos três modelos ajustados com a técnica volumétrica permitiram dizer que o coeficiente de determinação ajustado obteve o mesmo comportamento segundo os três métodos testados. Todos os casos o ajuste demonstrou altos valores para o coeficiente de determinação, variando de 0.8108 até 0.9721. Sendo que os modelos através do método do Criterion foram os que apresentaram os menores valores, seguidos daqueles com o Masser e após

os com a Cubagem Rigorosa. Pode-se observar que tanto para o método da Cubagem Rigorosa, do Criterion e do Masser o modelo de Spurr (nº 1) e o de Shumacker-Hall (nº 2) tiveram as maiores e melhores estimativas para todos os critérios analisados. Sendo que nestes modelos praticamente não houve diferença entre os índices avaliados. Para o AIC houve essa mesma tendência, dos modelos de Spurr e do Schumacker-Hall apresentarem os menores e melhores valores, sendo eles com pouca diferença. A única exceção existente foi para o método com o Masser que o modelo nº 2 apresentou valor de AIC e  $R^2_{aj}$  um pouco maior. Diante destes, percebe-se que a introdução de uma segunda variável independente, altura, nos modelos melhorou seu ajuste. Comportamento semelhante a este, Silveira (2009) encontrou com o ajuste de diversos modelos aritméticos e logarítmicos. Fato este que indica que a adição de uma segunda variável independente no modelo melhora sua capacidade de explicação biológica da biomassa. O coeficiente de variação e o erro padrão da predição tiveram a mesma tendência nos três métodos. Os dados fornecidos pela cubagem apresentaram os melhores valores de coeficiente de variação, seguidos daqueles pelo masser e após os com o criterion. Como pretendia selecionar apenas um modelo para análise dos erros da predição da biomassa com o mesmo, optou por aqueles que apresentaram o maior AIC, já que os outros índices forneceram valores muito próximos.

#### 4.3.4 Modelos selecionados para análise dos erros de predição

Após analisar os modelos segundo seus critérios de seleção, selecionaram-se aqueles que apresentaram as melhores estimativas, Tabela 4.5, para realizar a predição e verificar seus respectivos erros.

Tabela 4.5 – Modelos selecionados para predição da biomassa do tronco das árvores sob a Técnica Gravimétrica e a Volumétrica.

| <b>Técnica</b> | <b>Método</b>    | <b>Modelo Matemático</b>  |
|----------------|------------------|---|
|                | Cubagem Rigorosa | $\ln b = -3,9193 + 1,0069 \cdot \ln (d^2h)$                     |
| Volumétrica    | Criterion        | $\ln b = -3,7655 + 0,9736 \cdot \ln (d^2h)$                     |
|                | Masser           | $\ln b = -3,4674 + 2,0234 \cdot \ln (d) + 0,6964 \cdot \ln (h)$ |
| Gravimétrica   | -                | $\ln b = -3,8421 + 0,9976 \cdot \ln (d^2h)$                     |

Sendo que,  $b$  é a biomassa do fuste (kg),  $d$  é o diâmetro à altura do peito (cm),  $h$  é a altura total (m) e  $\ln$  é o logaritmo natural.

Deste modo, percebe-se que o modelo de Spurr, com variáveis independentes diâmetro e altura combinadas, foi selecionado em todos os casos estudados, exceto para a técnica volumétrica com o método do masser que foi o modelo de Schumacker-Hall. Como observado na Tabela 4.5, os modelos com as duas variáveis independentes foram aqueles com melhor ajuste e selecionados para a predição. Todos os modelos para as diferentes técnicas, com seus respectivos coeficientes de regressão podem ser visualizados no Anexo A e B.

#### 4.3.5 Erros de predição com os diversos métodos de ajuste

O erro relativo de predição (%) em função do DAP (cm) pela cubagem rigorosa tradicional e através da modelagem de seus dados pode ser visualizado na figura a seguir.

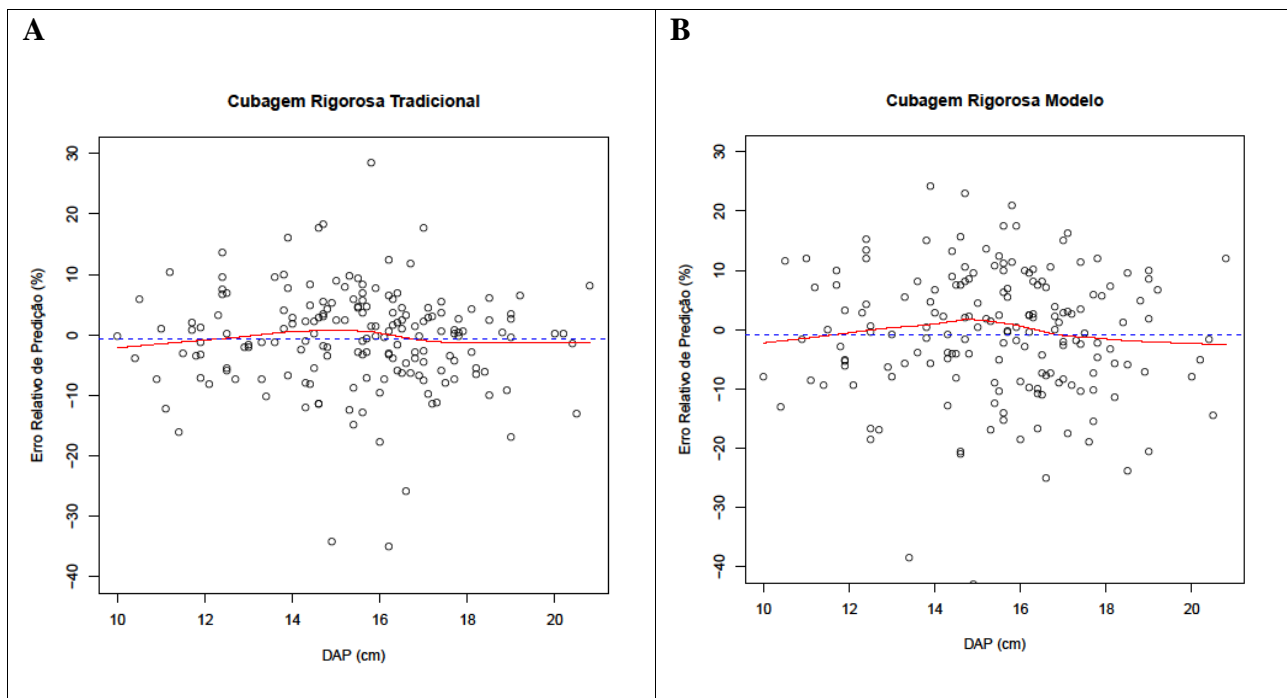


Figura 4.2 – (A) Erro Relativo de Predição (%) da Cubagem Rigorosa Tradicional em função do DAP (cm) e (B) com os dados da Cubagem Rigorosa por meio do melhor modelo ajustado em função do DAP (cm).

Como pode ser visualizado na Figura 4.2, a média do erro de predição apresentado por meio dos dados provenientes da cubagem rigorosa (-0,66%) e com aqueles resultantes da predição dos modelos (-0,94%) teve valores muito próximos de zero. Fato este, que já era de se esperar, pois a cubagem se bem realizada conduz a estimativas com grande confiabilidade. O desvio padrão desta predição obteve-se 8,27% para a cubagem convencional e 11,34% para o modelo. Resultado este que, confirma que a distribuição mais uniforme foi apresentada na Figura 4.2 (A), onde as observações de modo geral variam de  $\pm 10\%$  com variância homogênea. Porém,

em ambos os casos a média das observações teve comportamento semelhante com o aumento do DAP das árvores. De modo geral, a média foi levemente superestimada, apenas, entre aproximadamente 14 e 16 cm do diâmetro que a média demonstrou estar sendo subestimada.

O erro relativo de predição (%) com o Criterion obtido de forma não destrutiva em função do DAP (cm) e com o ajuste pelo melhor modelo também em função do DAP (cm) pode ser visto na Figura 4.3.

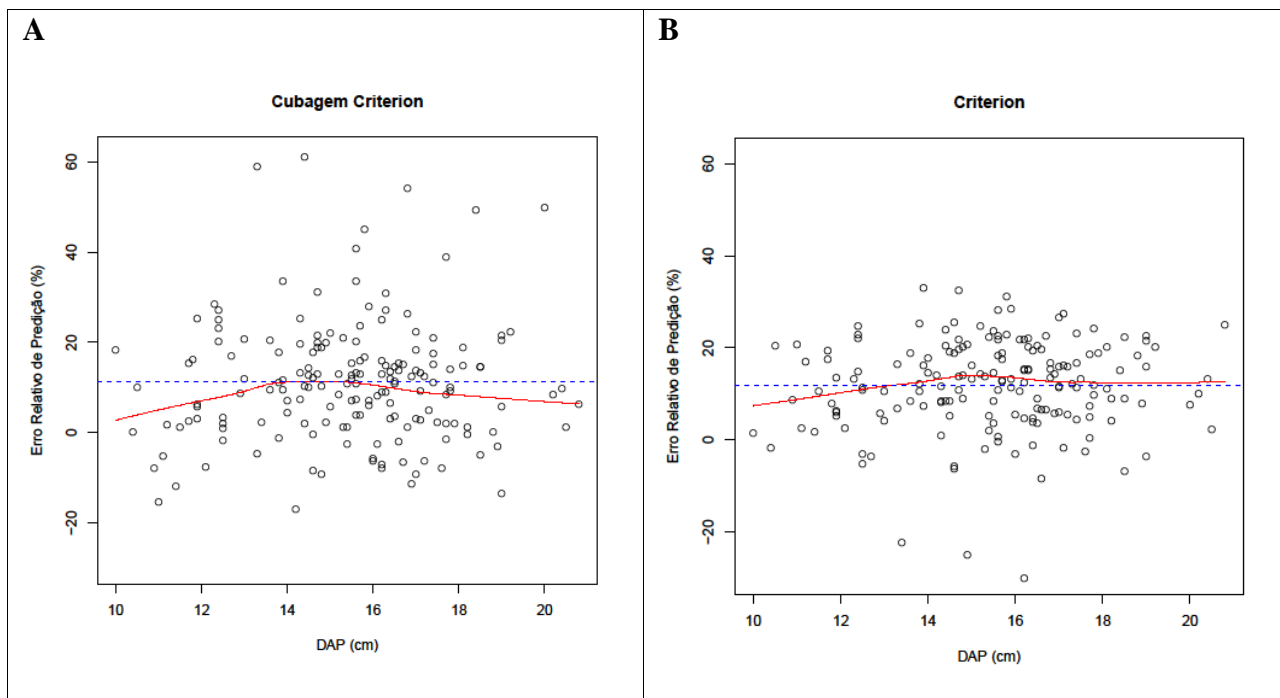


Figura 4.3 – (A) Erro Relativo de Predição (%) da Cubagem pelo Criterion de forma não destrutiva em função do DAP (cm) e (B) com os dados do Criterion para o ajuste através do melhor modelo ajustado em função do DAP (cm).

Analisando a distribuição dos erros de predição para o Criterion percebe-se o mesmo comportamento quando feita a cubagem pelo RC3H da Masser. Onde com a melhor distribuição dos resíduos foi encontrada quando realizado o ajuste pelo melhor modelo. Fator este, comprovado pelos valores do desvio padrão desse erro, sendo 13,38% na forma não destrutiva e 9,94% com o ajuste. As médias para este caso foram superestimadas em torno de 11%. Este dendrômetro também tendeu a fornecer medidas mais precisas para os indivíduos de menor porte. Williams et al. (1999) avaliando equações de taper ajustadas com dados resultantes de dois dendrômetros ópticos, Barr & Stroud e do Criterion 400, notaram que houve diferença significativa apenas aquelas geradas com o Criterion.

A Figura 4.4 demonstra o erro relativo de predição (%) em função do DAP (cm) para a cubagem não destrutiva do RC3H da Masser e com os dados obtidos pelo mesmo através da modelagem.

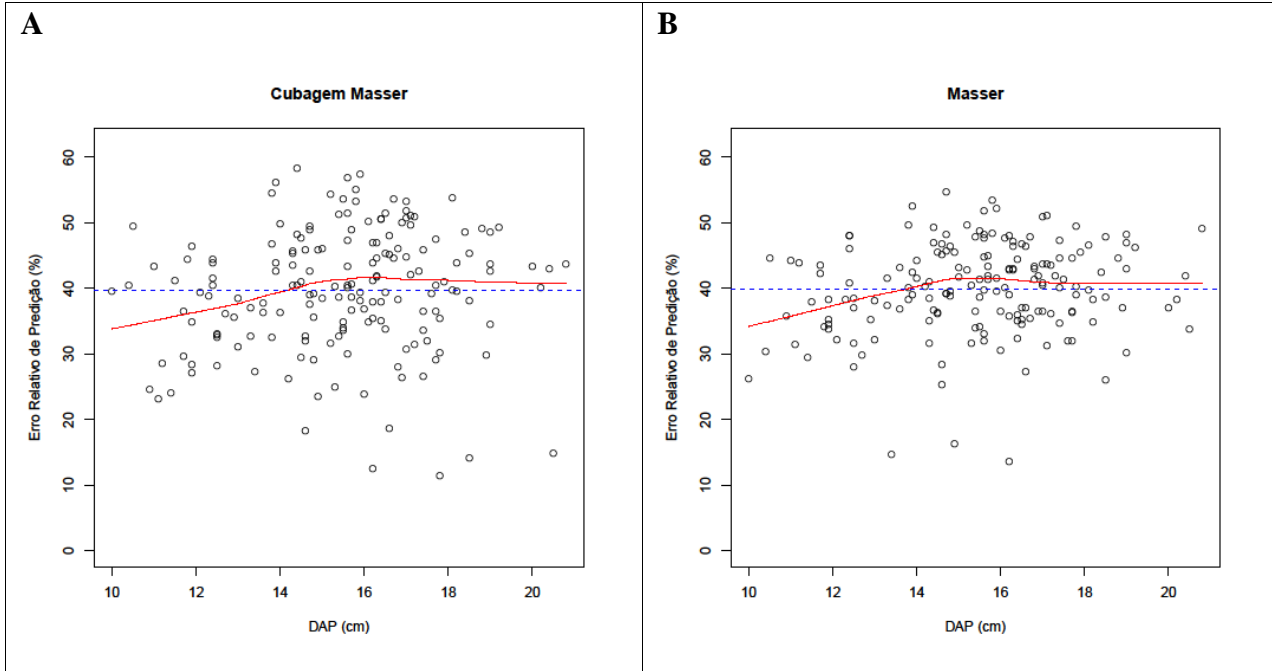


Figura 4.4 – (A) Erro Relativo de Predição (%) da Cubagem pelo Masser de forma não destrutiva em função do DAP (cm) e (B) com os dados do Masser para o ajuste através do melhor modelo ajustado em função do DAP (cm).

O dendrômetro RC3H da Masser forneceu um erro de predição subestimado em média de praticamente 40% tanto na cubagem não destrutiva, como pelo modelo selecionado. O erro foi diretamente proporcional ao diâmetro até cerca dos 16 cm, quando tendeu a ser constante com o aumento do tamanho dos indivíduos. Ou seja, para as árvores de menor DAP o equipamento tende a fornecer medidas mais precisas. Porém, de modo geral não houve uma tendência na predição da biomassa do fuste pelos métodos testados, o que caracteriza novamente variância homogênea. Através da distribuição das observações, percebe-se um comportamento contrário ao que aconteceu com os dados da cubagem rigorosa tradicional. A distribuição dos resíduos na Figura 4.4 (B) teve comportamento mais uniforme que aquela obtida pela cubagem não destrutiva. Fato este comprovado pelos valores do desvio padrão de 9,26% para a forma não destrutiva e de 6,96% com o ajuste do modelo. Soares et. al (2005) obtiveram a mesma tendência do erro padrão residual percentual, ou seja, não haver uma tendência na estimação dos estoques

de carbono do tronco em povoamentos de eucaliptos em equações com as variáveis independentes idade e índice de sítio.

#### **4.4 Conclusão**

Os resultados deste estudo mostraram que pode haver grandes diferenças nas estimativas de biomassa do fuste para os métodos de determinação não destrutiva, quando comparadas aos valores da cubagem rigorosa. Assim, analisando a acurácia dos dois dendrômetros ópticos para a predição da biomassa do fuste concluiu-se que em ambos os casos a variável de interesse foi subestimada. Sendo que o Criterion foi aquele que forneceu nas estimativas mais exatas.

Por meio dos modelos estudados concluiu-se que de modo geral houve um bom ajuste para todos os métodos. Através da distribuição gráfica do erro de predição percebeu-se um comportamento mais uniforme dos resíduos para os valores obtidos do melhor modelo do que aqueles da técnica volumétrica, exceto para os dados da cubagem rigorosa tradicional. Sendo que o erro de predição relativo com a cubagem rigorosa forneceu uma média superestimada de aproximadamente 1%. Com a predição do Criterion foi subestimado em média 11% e com o RC3H o erro foi subestimado em torno de 40%. Porém, em ambos os casos não houve uma tendência do erro de predição da biomassa, ou seja, todos os métodos estudados a variância mantevesse homogênea. Comparando estes resultados com o erro comumente admitido nos inventários florestais de 10%, nota-se que a utilização do dendrômetro óptico Criterion para predição da biomassa sob forma não destrutiva pode fornecer estimativas próximas do aceitável. Além do mais, determinar a biomassa através desta metodologia exige grandes cuidados na observação das variáveis, tais como, distância árvore-observador, presença de obstáculos e presença de vento nas medições. Assim, quanto mais precisa for a estimativa dos diâmetros medidos sob forma não destrutiva, mais confiável será a estimativa da biomassa estocada nas florestas.

#### **Referências**

BURHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Model selection and multimodel inference: practical information theoretic approach. 2<sup>nd</sup>.ed. New York: Springer, 2002. 488p.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997. 55 p.



FEARNSIDE, P.M.; LEAL FILHO, N.; FERNANDES, F.M. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 98, n. D9, p. 16733-16743, 1993.

HESS, A.F. **Inter-relações no crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em diferentes locais do Rio Grande do Sul**. Santa Maria/RS, 2009. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; 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.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO<sub>2</sub> – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-145.

MACHADO, S.A. NASCIMENTO, R.G.M.; AUGUSTYNCZIK, A.L.D.; SILVA, L.C.R.; FIGURA, M.A.; PEREIRA, E.M.; TEO, S.J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capao da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo/PR, n.56, p.5-16, jan/jun, 2008.

MELO, A.C.G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 149–154, 2006.

NELSON, B.W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J.; SOUZA, S.G.; BATISTA, G.; COUTO, L.B. Allometric regressions for improved estimate off secondary forest biomass in the central Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 117, p. 149-167, 1999.

SANQUETTA, C.R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT, R.M.; ZILIOOTTO, M.A.B.; GOMES, F.S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p. 119-140.

SILVEIRA, P. Ajuste de modelos matemáticos para estimar biomassa aérea em Floresta Ombrófila Densa. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 39, n. 4, p. 743-752, out./dez. 2009.

SILVA, H.D.; FERREIRA, C.A.; CORREA, R.S.; BELLOTE, A.F.J.; TUSSOLINI, E.L. Alocação de biomassa e ajuste de equações para estimativa de biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo/PR. n.49, p. 83-95. jul./dez. 2004.

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; GORGENS, E.B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 29, n. 5, p. 711-718, ago. 2005.

WILLIAMS, M.S.; CORMIER, K.L.; BRIGGS, R.G.; MARTINEZ, D.R. Evaluation of the Barr & Stroud FP15 and Criterion 400 Laser Dendrometers for Measuring Upper Stem Diameters and Heights. **Forest Science**. Washington, v.45, n.1, p. 53-61. 1999.

## ANEXOS



**ANEXO A** – Modelos com as estimativas dos coeficientes dos diversos modelos testados para a predição da biomassa do fuste sob a técnica gravimétrica.

| <b>Equação</b> | <b>Modelo</b>   |
|----------------|---|
| <b>1</b>       | $\ln b = -3,9193 + 1,0069 \ln (d^2h)$   |
| <b>2</b>       | $b = 1,4273 + 0,0208 (d^2h)$  |
| <b>3</b>       | $b = 11,3684 + -0,1613 (d^2) + 0,0261 (d^2h) - 0,1317 (h)$                                |
| <b>4</b>       | $b = - 548,6104 + 92,0276 (d) - 3,7531 (d^2) - 3,0641 (dh) + 0,1491 (d^2h) + 17,6917 (h)$ |
| <b>5</b>       | $b = 24,9473 - 0,0497 (d^2) + 0,0120 (d^2h) + 0,0123 (dh^2) - 0,1248 (h^2)$               |
| <b>6</b>       | $\ln b = -3,8947 + 1,9397 \ln (d) + 1,0891 \ln (h)$                                       |
| <b>7</b>       | $\ln b = -2,0937 - 2,5296 \cdot \ln (1/d)$  |

Sendo que:  $b$  é a biomassa (kg),  $d$  é o diâmetro a altura do peito (cm),  $h$  é a altura (m) e  $\ln$  é o logaritmo natural.

**ANEXO B** – Modelos com as estimativas dos coeficientes dos diversos modelos testados para a predição da biomassa do fuste sob a técnica volumétrica.

| <b>Método</b>    | <b>Equação</b> | <b>Modelo</b>   |
|------------------|----------------|---|
| Cubagem Rigorosa | 1              | $\ln b = -3,9193 + 1,0069 \cdot \ln (d^2h)$                     |
|                  | 2              | $\ln b = -4,0348 + 1,9689 \cdot \ln (d) + 1,0810 \cdot \ln (h)$ |
|                  | 3              | $\ln b = -2,1579 - 2,5543 \cdot \ln (1/d)$                      |
| Criterion        | 1              | $\ln b = -3,7655 + 0,9736 \cdot \ln (d^2h)$                     |
|                  | 2              | $\ln b = -4,0450 + 1,8385 \cdot \ln (d) + 1,1529 \cdot \ln (h)$ |
|                  | 3              | $\ln b = -2,0432 - 2,4689 \cdot \ln (1/d)$                      |
| Masser           | 1              | $\ln b = -3,8446 + 0,9383 \cdot \ln (d^2h)$                     |
|                  | 2              | $\ln b = -3,4674 + 2,0234 \cdot \ln (d) + 0,6964 \cdot \ln (h)$ |
|                  | 3              | $\ln b = -2,2583 - 2,4006 \cdot \ln (1/d)$                      |

Sendo que:  $b$  é a biomassa (kg),  $d$  é o diâmetro a altura do peito (cm),  $h$  é a altura (m) e  $\ln$  é o logaritmo natural.