

Estimativa da Biomassa e Carbono em Áreas Restauradas com Plantio de Essências Nativas

*Jeanicolau Simone de Lacerda
Hilton Thadeu Zarate do Couto
Marcia Makiko Hirota
Natália Pasishnyk
Jefferson Lordelo Polizel*



ABSTRACT

Biomass and Carbon Estimation in Native Tree Species Plantations for Restoration

Alometric models of wood biomass and carbon content for mixed species forest plantations in the State of São Paulo are presented. Studied plantations range from 2 to 7 years of age and comprehend 72 different native species. Alometric models predict total content of biomass and carbon as well as content for stem and branches separately. Average total biomass and carbon contents of field plots are reported for the plantations and, based on plantation age, mean annual increment of biomass and carbon is presented. In the studied plantations, branches represent an important component of biomass and carbon content for the trees and the forests.

APRESENTAÇÃO

1 Introdução

O aquecimento global causado, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral), atividades agrícolas, a degradação dos ambientes terrestres, vem provocando mudanças climáticas no planeta. Os desmatamentos para fins agrícolas, a urbanização e as construções de estradas, ferrovias, represas, mineração a céu aberto, são as principais causas da degradação dos ambientes terrestres (Dias e Griffith, 1998).

METRVM, n.5/novembro/2009

METRVM (ISSN 1519-5058) é uma publicação on-line do Centro de Métodos Quantitativos do Depto. de Ciências Florestais, ESALQ, Universidade de São Paulo. Seu objetivo é disponibilizar documentos de caráter técnico produzidos pelo laboratório na área de mensuração, biometria e bioestatística florestal.

METRVM é produzido utilizando sistema T_EX & L^AT_EX sob o sistema operacional Linux.

<http://cmq.esalq.usp.br/wiki/doku.php?id=publico:metrvm:start>

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que reúne mais de dois mil cientistas de diversos países, essas mudanças podem levar ao derretimento parcial ou até mesmo total das calotas polares, provocando o aumento do nível médio dos mares e alterações na circulação oceânica. Este fenômeno é consequência da intensificação do chamado “efeito estufa”, causada pela emissão em excesso principalmente do CO₂ na atmosfera. A remoção e fixação do carbono da atmosfera na biosfera terrestre é uma das opções que vem sendo propostas para compensar a emissão deste gás.

Em países tropicais, historicamente a floresta vem sendo substituída pelas culturas agrícolas e pastagens. Esta situação pode mudar se serviços adicionais forem considerados, principalmente o seqüestro de carbono. Pagamentos por tal serviço, estipulados nos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto, podem ser um incentivo aos proprietários de terras nos países em desenvolvimento para a recomposição e/ou não supressão das florestas.

A Mata Atlântica é o bioma que tem sido afetado de forma que é considerado um dos mais ameaçados do mundo. Levantamentos recentes da cobertura da vegetação nativa do estado de São Paulo (Kronka et al, 2005) mostram que restam apenas 12 % da área ocupada pela vegetação nativa original, sendo que menos de 5% são efetivamente cobertas com florestas nativas com baixo grau de perturbação antrópica. Além dos benefícios da conservação e restauração das florestas ciliares para a melhoria da quantidade e qualidade da água produzida em pequenas bacias hidrográficas, outra função que acrescenta valor a estes ecossistemas é a remoção ou seqüestro de gases do efeito estufa, em especial o CO₂ oriundo da queima de combustíveis fósseis, da atmosfera, que contribui para a mitigação dos efeitos do aquecimento global.

Assim, a avaliação dos estoques de carbono e também das mudanças nestes reservatórios torna-se necessária. Sabe-se que o cálculo da biomassa em uma floresta é um instrumento essencial ao conhecimento dos seus produtos e também tornou-se relevante à questões ligadas às mudanças climáticas. Por exemplo, o papel das florestas tropicais nos ciclos biogeoquímicos, especialmente o do carbono e a sua relação ao efeito estufa, tem aumentado o interesse em estimativas da biomassa nestas florestas. A biomassa fornece estimativas nos reservatórios florestais de carbono, pois aproximadamente 50% dela é carbono.

Os valores encontrados na literatura sobre fixação de carbono na forma de CO₂-equivalente são variáveis. O próprio IPCC recomenda que seja desenvolvida para cada situação uma metodologia específica o que confere credibilidade para o projeto. Para florestas tropicais nas Américas o IPCC (2006) apresenta valores de 60 a 400 Mg.ha⁻¹, o que corresponde de 103,4 a 689,3 Mg.ha⁻¹ de CO₂-equivalente. Bufo (2008) mostra que o uso de uma equação desenvolvida especificamente para uma determinada situação apresenta uma diferença de mais de 100% na estimativa de biomassa e carbono em florestas restauradas com essências nativas de alta diversidade quando comparada com uma equação geral.

2 *Objetivo*

Nesse trabalho são apresentados modelos de biomassa florestal e do teor de carbono de espécies nativas amplamente utilizadas em áreas de restauração florestal no Estado de São Paulo. São apresentados também resultados das primeiras avaliações da quantidade de CO₂-equivalente removida da atmosfera pela biomassa aérea de reflorestamentos de áreas degradadas. Para o desenvolvimento do trabalho foram determinados a biomassa e os teores de carbono orgânico para tronco e galhada de seis espécies utilizadas amplamente para fins de restauração no Estado de São Paulo. Também foram testados e selecionados modelos para quantificação de biomassa e carbono orgânico para espécies com diferentes ritmos de crescimento (pioneiras e não-pioneiras).

3 *Estimativas de Biomassa Acima do Solo e Carbono*

Estimativas sobre o fluxo de carbono através de mudanças no uso da terra nos trópicos são derivadas de modelos em que os resultados dependem, em parte, da estimativa de biomassa nas florestas (Brown e Lugo, 1992). O estudo de metodologias para estimar a biomassa de florestas tropicais tem sido objetivo de diversos trabalhos. As florestas tropicais representam grandes estoques de carbono, embora sua contribuição quantitativa ainda esteja sob estudos (Chave et al, 2005). Devido à grande biodiversidade das florestas tropicais, equações específicas para espécies não podem ser utilizadas, como na zona temperada, e sim equações mistas.

Um bom método para quantificar as reservas de carbono na biomassa consiste em inferir mudanças em parcelas permanentes em florestas. Modelos de regressão são usados para converter os dados do inventário em estimativas da biomassa acima do solo.

De acordo com Brown e Lugo (1992), dois aspectos sobre a biomassa das florestas são críticos no que se refere a modelos de fluxo terrestre de carbono nas florestas tropicais. O primeiro diz respeito a biomassa total que inclui a biomassa acima do solo e biomassa viva abaixo do solo, além daquela morta. A quantidade de biomassa em uma floresta determina o potencial de estocagem de carbono visto que 1Mg de biomassa equivale a 0,5 Mg de carbono que poderia ser liberado na atmosfera devido a mudanças no uso da terra. O segundo aspecto considera a resposta de todos estes elementos a retirada da floresta e regeneração e como eles devem estar representados em um modelo. A estrutura do modelo determina (1) qual proporção de biomassa é imediatamente oxidada e qual é decomposta em maior intervalo de tempo e (2) a velocidade de acumulação durante o crescimento. Ainda segundo Brown e Lugo (1992), a maior parte das pesquisas relativas à estimativa de biomassa tem focado no componente 'árvore' da floresta, pois este representa a maior fração da biomassa total, suas respostas aos processos de retirada e crescimento (regeneração) estão razoavelmente bem compreendidos para os propósitos dos modelos e ainda, os inventários florestais geralmente dão informações apenas para este componente.

Também segundo Brown (1997), a FAO considera que a estimativa da biomassa aérea

(tronco, galhada, casca e folhas) representa a maior fração de biomassa da floresta e não apresenta muitas dificuldades logísticas para sua estimativa. A FAO propõe as seguintes regressões de acordo com o tipo de floresta:

- Florestas de zonas climáticas secas (dry)

$$\hat{b} = 10^{[-0,535 + \log_{10}(g)]}$$

- Florestas de zonas climáticas úmidas (moist)

$$\hat{b} = \exp[-2,134 + 2,530 \ln(d)]$$

- Florestas de zonas climáticas muito úmidas (wet)

$$\hat{b} = 21,297 - 6,953(d) + 0,740(d^2)$$

onde:

\hat{b} – biomassa aérea estimada em kg;

g – área basal em cm²;

d – diâmetro a altura do peito em cm;

\log_{10} – logaritmo na base 10;

\ln – logaritmo na base natural (logaritmo neperiano).

Brown (1997) recomenda que, sempre que possível, devem ser desenvolvidas equações locais de biomassa, ou ao menos, que algumas árvores sejam abatidas para testar se a equação utilizada adéqua-se. Silver et al (2004), tendo estudado o seqüestro de carbono e a dinâmica da comunidade vegetal em pastagens convertidas em florestas em Porto Rico, utilizaram a equação indicada pela FAO para zonas climáticas muito úmidas. Neste estudo, concluíram que o seqüestro de C é significativo não só até os 20 anos após a conversão de pasto em floresta (fase considerada a de maior crescimento), mas até o 33º ano é também bastante significativa, assim como pelo solo em baixo de uma floresta convertida já madura. Hirotsuka et al (2005) também utilizando relações alométricas, mostraram em estudo na Indonésia o potencial das florestas plantadas em exercer funções como a de reservatório terrestre de C se comparadas com florestas primárias em regiões favoráveis.

Chave et. al. (2005), depois de analisarem 27 modelos realizados em estudos nos trópicos (2410 árvores abatidas no total, de 20 °N a 12 °S), concluíram que os mais importantes preditores da biomassa acima do solo são, em ordem decrescente, diâmetro do tronco, densidade básica, peso total e tipo de floresta (úmida, seca, etc.). Chave et. al. (2005) descreveram então dois principais tipos de equações: aquelas que consideram DAP, altura total e densidade básica e aquelas que desconsideram a altura total. Cada tipo de modelo possui seis versões particulares e os melhores modelos obtidos segundo o tipo de floresta foram:

- Florestas de zonas climáticas secas (dry)

$$\hat{g} = 0,112 (\rho d^2 h)^{0,916}$$

$$\hat{g} = \rho \exp [-0,667 + 1,784 \ln(d) + 0,207(\ln(d))^2 - 0,0281(\ln(d))^3]$$

- Florestas de zonas climáticas úmidas (moist)

$$\hat{g} = 0,0509 (\rho d^2 h)$$

$$\hat{g} = \rho \exp [-1,499 + 2,1481 \ln(d) + 0,207 (\ln(d))^2 - 0,0281 (\ln(d))^3]$$

- Florestas de zonas climáticas muito úmidas (wet)

$$\hat{g} = 0,0776 (\rho d^2 h)^{0,940}$$

$$\hat{g} = \rho \exp [-1,239 + 1,980 \ln(d) + 0,270 (\ln(d))^2 - 0,0281 (\ln(d))^3]$$

- Mangues (moist mangrove forest stand)

$$\hat{g} = 0,0509 (\rho d^2 h)$$

$$\hat{g} = \rho \exp [-1,349 + 1,980 \ln(d) + 0,207 (\ln(d))^2 - 0,0281 (\ln(d))^3]$$

onde:

\hat{b} – biomassa aérea estimada em kg;

g – área basal em cm²;

d – diâmetro a altura do peito em cm;

h – altura (m);

ρ – densidade básica (g/cm³);

ln – logaritmo na base natural (logaritmo neperiano).

4 *Locais de Coleta de Dados*

Selecionou-se 4 áreas com plantios de essências nativas no Estado de São Paulo, bioma Mata Atlântica. As áreas selecionadas e as respectivas informações estão na tabela 1. Os critérios para esta seleção foram as variações existentes entre as produtividades visuais, a localização em diferentes condições ecológicas, as áreas com maiores extensões de plantio, e principalmente a idade e os recursos disponíveis para a realização da coleta de dados em campo. Com isso procurou-se dar a maior abrangência possível para as populações existentes.

Tabela 1: Áreas do estado de São Paulo inventariadas para estimar biomassa e carbono.

Local	Plantio (mês/ano)	Área (ha)	Mudas plantadas (mil)	Proprietário
Penápolis-SP	Agosto/2000	25	50	DAEP
Ibaté-SP	Março/2003	7,3	14,5	Viveiro
Valparaíso-SP	Janeiro/2002	14,7	25	Usina
Guaraçai-SP	Junho/2005	10	20	Usina Gasa

5 Parcelas de Inventário

Em cada local selecionado foram instaladas 10 parcelas permanentes, exceto em Penápolis, que por ter uma maior área, foram instaladas 20 parcelas. O total de parcelas instaladas nesta fase foi de 50 e o tamanho de cada uma de cerca de 200 m² (30 árvores), onde no total mediram-se 1017 árvores. As parcelas permanentes foram marcadas no campo com piquetes de madeira, nos quatro cantos. Foram instaladas parcelas fixas de 30 pontos (árvores), com 3 linhas de 10 pontos cada, dentro dos povoamentos. Tais parcelas, localizadas a pelo menos 50m uma a outra. Foram também pintadas faixas brancas nas primeiras e últimas árvores de cada linha da parcela, além de ser demarcado o número da parcela na “entrada” da mesma, no carreador, também foi tomada a coordenada GPS de cada uma delas. Como as áreas selecionadas foram áreas de preservação permanente ao longo de cursos d’água, a forma das parcelas é retangular com o maior comprimento ao longo dos cursos d’água.

De cada árvore ou ponto plantio foram coletadas as seguintes características:

- Espécie;
- Altura;
- Diâmetro (DAP);
- Presença de fruto;
- Presença de semente;
- Presença de flor;
- Árvore cortada;
- Árvore morta;
- Árvore tombada;
- Árvore quebrada;
- Árvore com diâmetro menor que 5 cm;
- Falha (árvores inexistentes);

Tabela 2: Espécies selecionadas para a geração das equações alométricas.

Espécie	Nome Popular	Classe Ecológica	Árvores Amostradas
Acácia mangium	Acácia mangium	pioneira	15
Anandeanthera colubrina	Angico Branco	não pioneira	15
Anandeanthera macrocarpa	Angico Vermelho	não pioneira	15
Inga laurina	Ingá Mirim	não pioneira	15
Inga uruguensis	Ingá Quatro Quinas	pioneira	15
Mimosa bimucronata	Maricá de Espinho	pioneira	15
TOTAL			90

- Bifurcada abaixo do nível do DAP.

Todos os diâmetros foram tomados à altura do peito (1,30m) e medidos com emprego de uma suta Haglöf com precisão de 0,5cm. As alturas foram tomadas com o emprego de um hipsômetro a laser da marca Vertex. As coordenadas geográficas da entrada de cada parcela foram tomadas a partir do emprego de um GPS Garmin modelo Etrex. Todos os dados foram registrados em planilhas específicas para posterior digitação e tratamento e análise estatística dos dados pelo SAS (*Statistical Analysis System*). Além destes dados tomados por ponto, foram registradas informações da situação da parcela, como: presença de formigueiros; presença de enxame de abelhas; presença de cupins.

Quanto à variabilidade e ocorrência de espécies, fator que determina diretamente quais e quantas espécies deverão ser amostradas para fins de determinação de biomassa e carbono, verificou-se que havia 74 espécies das quais 12 representavam 60% de todos os indivíduos encontrados.

6 Coleta de Dados Para Construção dos Modelos de Biomassa e Carbono

No povoamento de maior idade, localizado em Penápolis, foram selecionadas as 6 espécies de maior ocorrência para a coleta de material para estimativa da biomassa e carbono e elaboração das equações alométricas. As espécies selecionadas abrangem 3 pioneiras e 3 não-pioneiras (tabela 2).

De cada espécie foram selecionadas 15 árvores sendo 5 em cada classe de DAP (5 a 10 cm, 10 a 15 cm e acima de 15 cm). Estas 90 árvores foram selecionadas fora das parcelas fixas de inventário (monitoramento), tendo sido abatidas, amostradas, medidas e pesadas em campo (Figuras 2 a 5). De cada seção da árvore abatida foram medidos os diâmetros com e sem casca e o comprimento de cada seção tronco (figura 1).

De cada árvore abatida foram coletados 4 discos para posterior determinação de densi-



Figura 1: Medição do diâmetro de uma amostra do fuste para determinação posterior do teor de casca e da biomassa.



Figura 2: Abate de um indivíduo selecionado.



Figura 3: Medição do comprimento do fuste.



Figura 4: Retirada de disco do fuste para determinação de biomassa e teor de carbono.



Figura 5: Idem a figura anterior, porém na porção superior da mesma árvore.

dade básica e teor de carbono, sendo o primeiro a 0% da altura do fuste, outro no DAP, e os demais a 50% e 100 % da altura (figuras 6 e 7). Além disso, amostras da galhada também foram coletadas conforme a Figura 16.



Figura 6: Identificação de cada amostra retirada do fuste, indicando árvore e posição da amostra nas árvores, e o acondicionamento final das amostras para determinação do teor de umidade.

7 Biomassa Aérea das Árvores

As amostras de galhada foram secas em estufa à 105 °C até peso constante, a fim de se determinar a quantidade de água presente e a relação entre peso fresco e peso seco de todos os componentes. Para cada espécie, dois indivíduos (duas amostras de galhadas) foram secas à apenas 55 °C para que pudessem ser destinadas à quantificação do carbono. A determinação de carbono foi feita em equipamento LECO CHN-2000 do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA/USP. O material foi selecionado e preparado (moído) no Centro de Métodos Quantitativos da ESALQ/USP.

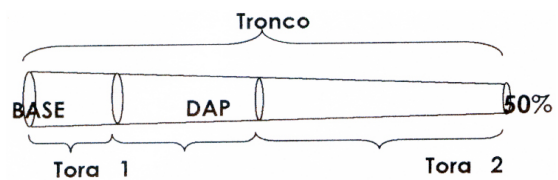


Figura 7: Esquema representativo do local da retirada dos discos no tronco dos indivíduos.



Figura 8: Preparo da galhada para pesagem da biomassa e obtenção de amostra para determinação do teor de umidade em laboratório.

Quanto aos discos, estes foram colocados em tanques e submersos em água a fim de que seja obtido seu volume saturado (verde). Após esta etapa, os discos foram secos em estufa a 105 °C até peso constante e então pesados. Em laboratório, a densidade básica da madeira dos discos foi determinada através do método da balança hidrostática e uso de uma estufa de circulação forçada. Assim como a galhada, os discos de dois indivíduos por espécie foram secos a 55 °C e encaminhados para a quantificação de carbono no CENA/USP. A densidade básica foi calculada para os quatro discos amostrados em cada árvore (D_{BBASE} , D_{BDAP} , $D_{B50\%}$ e $D_{B100\%}$) através da razão da massa seca pelo volume verde do disco.

O volume do tronco foi obtido a partir da fórmula de Smalian, aplicada a cada seção (tora), sendo que para cada árvore foram obtidas 3 toras (seções). A biomassa de cada tora foi obtida pelo produto do volume da tora e a média da densidade básica dos discos dos extremos da tora:

$$\textbf{Tora 1: } b_1 = v_1 [D_{BBASE} + D_{BDAP}] / 2$$

$$\textbf{Tora 2: } b_2 = v_2 [D_{BDAP} + D_{B50\%}] / 2$$

$$\textbf{Tora 3: } b_3 = v_3 [D_{B50\%} + D_{B100\%}] / 2$$

onde:

v_i – volume da tora i ($i = 1, 2, 3$) em m^3 ;

D_B – densidade básica do disco retirado a dada altura (base, DAP, 50% da altura e 100% da altura) em $g\ cm^{-3}$.

A biomassa total do tronco de cada árvore foi obtida pela soma das biomassas das seções em m^3 .

Para a obtenção da biomassa da galhada, os seguintes passos foram realizados:

- (1°) Massa verde da galhada obtida em campo ($m_{V;GALHO}$).
- (2°) Massa verde da amostra da galhada obtida em campo ($m_{V;AMOSTRA}$).
- (3°) Massa seca da amostra da galhada obtida em laboratório ($M_{S;AMOSTRA}$).
- (4°) Biomassa da galhada:

$$b_{GALHO} = m_{V;GALHO} \left[\frac{m_{S;AMOSTRA}}{m_{V;AMOSTRA}} \right]$$

Finalmente, a biomassa aérea de cada árvore foi obtida pela soma da biomassa do tronco e a biomassa da galhada.

Os dados dendrométricos médios (DAP e altura total) por espécie, assim como a densidade básica média do tronco com casca e biomassa da galhada, do tronco e total, estão na tabela 3.

Tabela 3: Dados médios das espécies usados para elaboração das equações de biomassa. A densidade básica é referente à densidade média do tronco e da casca.

Espécie	DAP (cm)	Altura Total (m)	Densidade Básica (g cm ⁻¹)	Biomassa (kg)		
				Galhada	Tronco	Total
	(<i>d</i>)	(<i>h</i>)	(<i>D_B</i>)	(<i>b_G</i>)	(<i>b_F</i>)	(<i>b_T</i>)
Acácia mangium	11,94	7,40	0,4582	21,91	72,83	94,74
Anandeanthera colubrina	11,79	8,73	0,5289	18,08	92,41	110,48
Anandeanthera macrocarpa	12,43	8,37	0,4778	16,75	105,22	121,97
Inga laurina	11,73	8,65	0,4348	28,78	76,56	105,34
Inga uruguensis	11,58	8,21	0,4327	30,84	62,17	93,01
Mimosa bimucronata	12,01	8,43	0,5397	35,08	85,55	120,63

Verificou-se pequena diferença entre as espécies pioneiras e não-pioneiras, em relação à biomassa seca total (galhada e tronco com casca), o DAP e a densidade básica (tabela 4).

Tabela 4: Características das espécies pioneiras e não-pioneiras amostradas para o estudo da biomassa e carbono.

Classe Ecológica	DAP Médio (cm)	Biomassa Total (kg)	Densidade Básica Média (g.cm ⁻¹)
Pioneira	11,84	102,79	0,4769
Não-pioneira	11,98	112,60	0,4805

8 Teor de Carbono

O teor de carbono em cada árvore foi calculado como o produto de sua biomassa e do teor de carbono encontrado pelo CENA/USP. O teor médio de carbono nas amostras dos componentes da árvore, por espécie são apresentadas na tabela 5.

9 Modelos de Biomassa

Os dados: biomassa do tronco, da galhada e total, o DAP e altura total das árvores, foram usados para a elaboração das equações de biomassa para cada componente da parte aérea da árvore, assim como o total da biomassa aérea. Foram testados diversos modelos através da análise de regressão linear e não-linear. Os modelos foram escolhidos através do coeficiente de determinação e análise dos resíduos.

Não foi encontrada diferença estatisticamente significativa (teste Tukey, nível de pro-

Tabela 5: Teor de carbono médio (%) por espécie, para os três componentes da árvore: galhada, lenho e casca.

Espécie	Teor Médio de Carbono (%)		
	Galhada	Lenho	Casca
<i>Acácia mangium</i>	53.76	53.2	56.28
<i>Anadenanthera colubrina</i>	55.02	52.28	54.98
<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	54.92	53.1	54.92
<i>Inga laurina</i>	52.4	51.58	48.78
<i>Inga uruguensis</i>	50.14	51.3	48.72
<i>Mimosa bimucronata</i>	50.22	52.18	48.82

babilidade de 5%) entre as espécies pioneiras e não-pioneiras em relação às características: DAP médio, biomassa da galhada, biomassa do fuste, biomassa total e densidade básica média da madeira. Dessa forma, as seis espécies amostradas formaram um único grupo para a construção dos modelos de biomassa.

O modelo de equação de biomassa que apresentou melhor ajustamento aos dados foi o que utiliza o DAP apenas como variável independente, tanto para a biomassa total, biomassa do fuste como para biomassa da galhada. A inclusão da altura total, ou da densidade básica, pouco acrescentou na melhoria dos coeficientes de determinação e na análise dos resíduos. No caso da biomassa total, o coeficiente de determinação passou de 0,8656 (só DAP) para 0,8762 (para DAP e altura), ou seja, uma diferença de apenas 0,01 ou 1%. Esta diferença subiu para 0,0369 para o modelo de predição da biomassa do fuste. No modelo de biomassa da galhada, a variável altura acrescentou ainda menos na explicação de sua variação. A obtenção da variável altura total nos trabalhos de campo acrescenta alto custo à atividade de inventário, pois é mais demorada que a medição do DAP e apresenta alto erro de medição, sobretudo em populações de espécies folhosas, necessitando de pessoa habilitada e equipamento de alto custo para fazer esta estimativa.

Desse modo os modelos selecionados foram:

$$\ln(b_T) = -1,19829 + 1,98391 \ln(d) \quad R^2 = 0,8656 \quad (1)$$

$$\ln(b_F) = -1,96521 + 1,99688 \ln(d) \quad R^2 = 0,8816 \quad (2)$$

$$\ln(b_G) = -1,96722 + 1,99320 \ln(d) \quad R^2 = 0,6700 \quad (3)$$

onde:

\ln – logaritmo neperiano;

b_T – biomassa total da parte aérea: tronco + galhada (kg);

b_F – biomassa do tronco com casca (kg);

b_G – biomassa da galhada (kg);

d – diâmetro à altura do peito (cm);

R^2 – coeficiente de determinação.

Por outro lado, quando se utiliza no modelo de biomassa do tronco a altura comercial (altura do fuste), em substituição à altura total, o coeficiente de determinação (R^2) passa a ser de 0,9205:

$$\ln(b_F) = -2,53789 + 0,82275 \ln(d^2 h_F) \quad R^2 = 0,9205 \quad (4)$$

onde h_F é a altura comercial (fuste) (m).

Segundo a figura 9, pode-se notar que o modelo da biomassa total (equação 1) foi bem ajustado à variação dos dados encontrados, confirmando que não há tendência de super ou subestimação dos valores preditos.

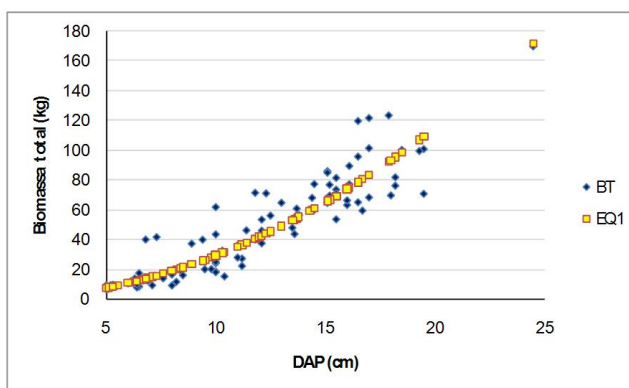


Figura 9: Comparação dos valores observados e preditos pela equação 1 de biomassa total (fuste + galhada) em relação ao DAP (cm). Legenda: BT – biomassa total, EQ1 - equação 1.

Quanto aos modelos de predição da biomassa do fuste, nota-se que a equação (2), baseada apenas no DAP, tem um comportamento inferior à equação (4), que utiliza como variáveis predictoras o DAP e altura comercial. A figura 10 apresenta uma comparação gráfica desses modelos.

O modelo de predição da biomassa da galhada foi o que apresentou menor qualidade ajuste à variação dos dados observados ($r^2=0,67$). No entanto, esta distribuição é homogênea ao longo do eixo, não demonstrando nenhuma tendência à super ou subestimação (existem pontos acima e abaixo ao longo de todo o eixo x). A figura 11 mostra os valores preditos pela equação (3) comparados aos valores observados de biomassa da galhada. Pode-se perceber uma ligeira tendência à subestimação dos valores quanto maior o valor de biomassa observado. Isto pode ser explicado, em parte, pelo fato de que a equação considera apenas o DAP como variável preditora, mas muitos indivíduos ramificam antes mesmo de 1,3m (94%), ou seja, o DAP é subestimado em relação ao volume de copa do indivíduo.

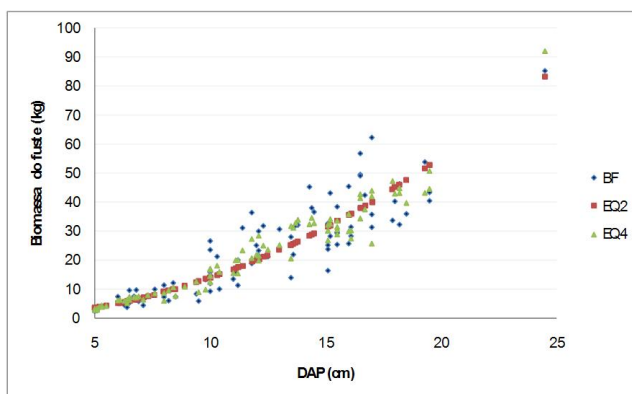


Figura 10: Comparação das equações de biomassa do fuste: EQ2 – equação (2) (DAP), EQ4 – equação (4) (DAP e altura comercial), BF – biomassa observada (kg).

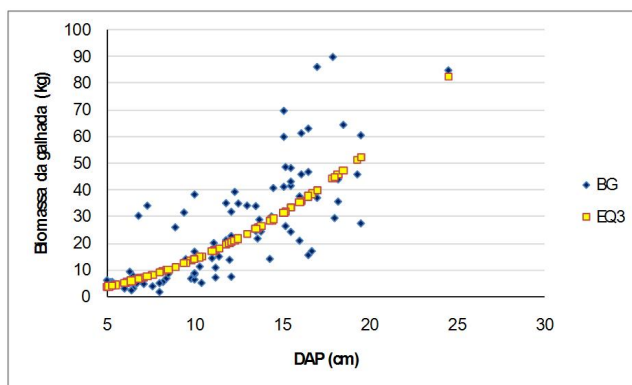


Figura 11: Comparação dos valores preditos de biomassa da galhada pela equação (3) e valores observados em relação ao DAP. BG=biomassa da galhada.

10 Modelos de Carbono

Para os modelos de quantidade de carbono por árvore, também o melhor ajuste foi obtido utilizando apenas o DAP como variável independente. A inclusão da altura total ou da densidade básica pouco acrescentou na melhoria dos coeficientes de determinação e na análise dos resíduos dos modelos de predição de carbono. O valor do coeficiente de determinação para o modelo de carbono total com apenas o DAP foi de 0,8707 e para o modelo que incluía a altura total das árvores foi de 0,8819, uma diferença de apenas 0,01 ou seja, 1%. Esta diferença subiu para 0,0351 para o modelo de predição de carbono no fuste (madeira + casca). No modelo de carbono da galhada, a variável altura quase não contribui na explicação de sua variação.

Os modelos selecionados de equações alométricas para a estimativa de carbono foram:

$$\ln(C_T) = -1,84511 + 1,98505 \ln(d) \quad R^2 = 0,8707 \quad (5)$$

$$\ln(C_F) = -2,61860 + 1,99854 \ln(d) \quad R^2 = 0,8801 \quad (6)$$

$$\ln(C_G) = -2,61205 + 1,99502 \ln(d) \quad R^2 = 0,6815 \quad (7)$$

onde:

C_T – carbono total da parte aérea: tronco + galhada (kg);

C_F – carbono no tronco com casca (kg);

C_G – carbono na galhada (kg);

d – diâmetro à altura do peito (cm);

\ln – logaritmo neperiano.

A figura 12 compara os valores preditos pela equação (5) e os valores observados de carbono na galhada.

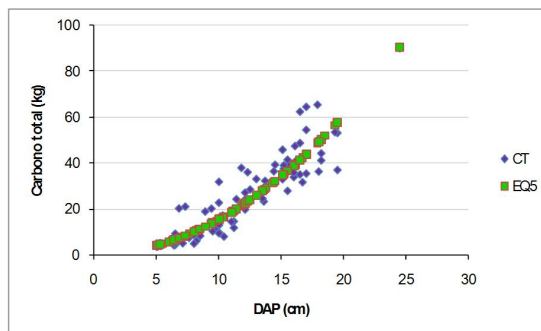


Figura 12: Comparação dos valores observados e preditos de carbono total (fuste + galhada) pela equação 5 em relação ao DAP. CT= carbono total (fuste + galhada).

A figura 13 evidencia o bom ajuste da equação (6) de predição do carbono do fuste aos valores observados. A partir de 10 cm de DAP a predição do carbono no fuste se torna menos acurada, porém, a equação ajusta-se bem aos dados observados e consegue explicar 88% da variação, conferindo boa predição.

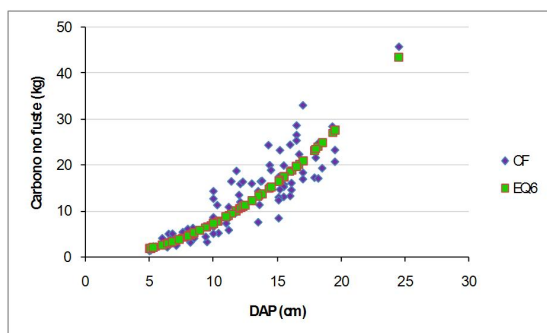


Figura 13: Comparação dos valores observados e preditos de carbono do fuste pela Eq.6 em relação ao DAP. CF= carbono no fuste (com casca).

A figura 14 compara os valores preditos de carbono na galhada pela equação (7) com os valores observados em relação ao DAP. Nota-se que a equação está bem ajustada à variação do carbono na galhada, porém os valores mais altos observados são subestimados pela equação. Assim como no caso da biomassa da galhada, esta subestimação pode estar ligada ao fato que 94% dos indivíduos são ramificados abaixo do DAP, o que pode causar a subestimação da copa (galhada) em relação ao DAP.

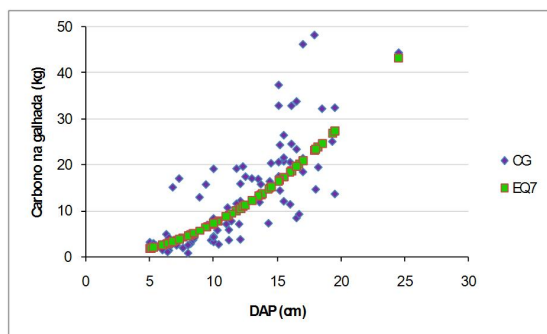


Figura 14: Comparação dos valores observados e preditos de carbono da galhada pela Eq.7 em relação ao DAP. CG= carbono da galhada.

11 Biomassa e Carbono das Florestas

Os dados de inventário florestal também foram analisados permitindo o diagnóstico das áreas. No geral 50% das parcelas apresentavam presença de formigueiros e 26% de cupins. Mais de 94% das árvores medidas apresentavam bifurcação abaixo do nível do

Tabela 6: Número de espécies identificadas em cada local e a espécie de maior ocorrência.

Local	Número de Espécies	Espécies de maior Ocorrência
Penápolis - SP	27	Ingá Quatro Quinas
Ibaté - SP	56	Marica de Espinho
Valparaíso - SP	14	Angico
Guaraçaí - SP	12	Sangra d'água
Total	74	Ingá Quatro Quinas

Tabela 7: Dados médios para os locais inventariados: número de árvores (1/ha), área basal (m^2/ha), biomassa (Mg/ha), quantidade de carbono (Mg/ha) e quantidade de carbono equivalente (Mg/ha).

Local	Idade (anos)	Número de Árvores (1/ha)	Área Basal (m^2/ha)	Biomassa (Mg/ha)	Carbono (Mg/ha)	Carbono Equivalente (Mg/ha)
Ibaté - SP	7,0	1776	10,76	50,74	25,95	95,15
Valparaíso - SP	4,5	1720	7,16	33,87	18,05	66,18
Guaraçaí - SP	5,5	1191	5,52	27,98	14,61	53,56
Penápolis - SP	2,0	1164	7,97	37,49	19,25	70,57
Média	5,2	1403	7,87	37,52	19,46	71,37

DAP (1,30 m) e a presença de frutos foi inferior a 4%. Foram identificadas 74 espécies nos quatro plantios inventariados.

A tabela 6 mostra o número de espécies (riqueza) encontrado em cada local, assim como a espécie de maior ocorrência.

Os valores médios para cada local estudado com as respectivas idades são apresentados na tabela 7. Também são apresentados o número de árvores existentes por hectare, a área basal e a quantidade de carbono equivalente (CO_2 -equivalente).

A estimativa do crescimento para cada local de estudo foi obtida através dos incrementos médios anuais em biomassa total e CO_2 -equivalente (tabela 8). O modelo que melhor se adaptou aos dados foi usado para calcular os valores de biomassa do fuste, da galhada e total dos outros plantios inventariados. Para estimar a quantidade de CO_2 -equivalente nas parcelas de inventário, utilizou-se os dados obtidos pela análise de carbono em amostras das árvores selecionadas para o abate.

A distribuição da biomassa da árvore entre fuste e galhada, mostrou que nas espécies pioneiras a galhada tendem a ter uma importância maior que o fuste (figura 15), enquanto que nas espécies não-pioneiras fuste e galhada apresenta biomassa parecidas.

Tabela 8: Incrementos médios anuais em biomassa total e carbono equivalente (CO₂-equivalente), ambos em Mg/ha*ano.

Local	Idade (anos)	Biomassa (Mg/ha.ano)	Carbono Equivalente (Mg/ha.ano)
Penápolis - SP	7,0	5,36	10,08
Ibaté - SP	4,5	11,28	21,14
Valparaíso - SP	5,5	6,16	12,03
Guaraçaí - SP	2,0	13,99	26,78
Média	5,2	9,19	17,51

Em várias espécies, a biomassa da galhada se mostrou mais importante que a do fuste (figura 16). Há que considerar a idade dos plantios estudados nesses resultados, pois a maior importância na distribuição da biomassa nos componentes de uma árvore aumenta com a idade.

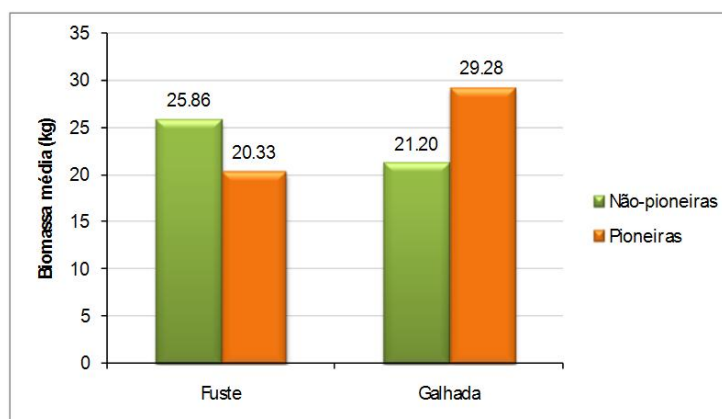


Figura 15: Distribuição da biomassa do fuste e da galhada segundo o grupo ecológico das árvores.

12 Conclusões

Os resultados mostram que há grande variação no crescimento das florestas plantadas com essência nativas. Esta variação é função não só da variação esperada entre sítios, mas também dos tratamentos culturais recebidos pelas plantas, a qualidade das mudas plantadas, assim como material genético, visto que em cada região os plantios foram executados por diferentes instituições. Não obstante, cada região tem uma idade de plantio distinta da outra, o que acaba impossibilitando a definição de uma curva de crescimento.

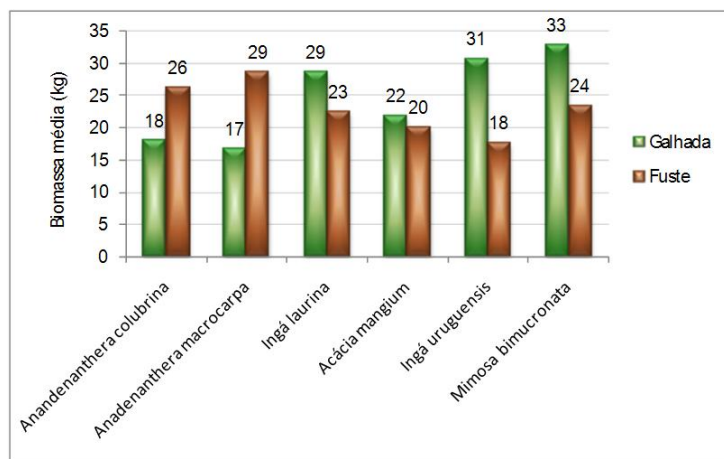


Figura 16: Distribuição da biomassa média do fuste e da galhada segundo a espécie das árvores.

O incremento médio anual (IMA) por árvore, em biomassa total, da parte aérea (tronco + galhada) das plantas para todos os locais é de $6,55 \text{ Kg.árvore}^{-1}$. Para CO_2 -equivalente, este incremento é de $12,48 \text{ Kg.árvore}^{-1}$. Isto representa $249,60 \text{ Kg.árvore}^{-1}$ de CO_2 -equivalente no 20º ano, ou seja, quatro árvores por tonelada de CO_2 -equivalente removido da atmosfera.

Porém dadas todas as restrições acima, aliadas ao fato de que a curva de crescimento não é linear, variando de inclinação conforme a idade, é muito provável que o número médio acima citado ($249,60 \text{ kg de CO}_2$ -equivalente/árvore em 20 anos) esteja superestimado, sendo que a definição do valor exato seja possível apenas com a definição da curva de crescimento dos povoamentos agora avaliados. Através do monitoramento até a idade de estagnação do crescimento dos povoamentos, poder-se-à obter uma curva de crescimento baseada nas informações obtidas nos plantios inventariados. Estima-se que esta curva poderá ser obtida com monitoramentos contínuos (a cada 1 ou 2 anos) até a idade de 20 a 30 anos. Desta forma as parcelas permanentes ora instaladas deverão ser monitoradas ao longo deste período.

Ocorre que a demanda por um índice de neutralização de CO_2 -equivalente é imediata, sendo necessário um número que balize todas as conversões. Assim, com atitude conservadora, pode-se eleger o menor IMA verificado, entre todos os povoamento medidos, que foi observado nos plantios de Valparaíso, $7,0 \text{ kgCO}_2\text{-eq.ano}^{-1}$ por árvore, ou $140,0 \text{ kg CO}_2$ -equivalente por árvore aos 20 anos de idade, ou $7,14$ árvores por tonelada de CO_2 -equivalente em 20 anos.

Bibliografia

ALBRECHT A., KANDJI S.T. 2003. *Carbon sequestration in tropical agroforestry systems*. Agriculture, Ecosystems and Environment v.99, p.15–27.

BUFO, L. V. B. 2008. Restauração Florestal e Estoque de Carbono em Modelos de Implantação de Mudas sob Diferentes Combinações de Espécies e Espaçamentos. Dissertação de Mestrado, ESALQ/USP, 87pp.

BROWN S. e LUGO A.E. 1990. *Tropical Secondary Forests*. Journal of Tropical Ecology, v.6(1), p.1-32.

BROWN S. e LUGO A.E. 1992. *Aboveground Biomass Estimates for Tropical Moist Forests of the Brazilian Amazon*. Interciencia, v.17(1), p.8-18.

BROWN S., GILLESPIE A.J.R. e LUGO A.E. 1989. *Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data*. Forest Science, v.35(4), p.881-902.

BROWN, S., 1997. *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest: A Primer*. Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 55p.

CHAVE J., ANDALO C., BROWN S., E. CAIRNS M. A., CHAMBERS J. Q., EAMUS D., FÖLSTER H., FROMARD F., HIGUCHI N., KIRA T., LESCURE J.-P., NELSO B. W. N., OGAWA H., PUIG H., RIÉRA B., YAMAKURA T. 2005. *Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests*. Oecologia, v.145, p.87-99.

DIAS, L.E. & GRIFFITH, J.J. 1998. Conceituação e Caracterização de áreas Degradadas. In: Dias, L.E. & Mello, J.W.U. (ed.) Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, p.1-7.

HIROTSUKA M. TOMA T., MINDAWATI N., HERIANSYAH I., MORIKAWA Y. 2005. *Biomass of a man-made forest of timber tree species in the humid tropics of West Java, Indonesia*. J.For. Res. v.10, p.487-491.

KRONKA, F. J. N.; NALON, M. A. & MATSUKUMA, C.K. Inventário Florestal da Vegetação Natural do Estado de São Paulo. São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal, 2005, 200p.

MOREIRA-BURGER D. e DELITTI W.B.C. 1999. *Fitomassa epigéa da mata ciliar do rio Mogi-Guaçu, Itapira – SP*. Revista Brasileira de Botânica, v.22(3), p.429-435.

OLSCHEWSKI R., BENÍTEZ P.C. 2005. *Secondary forests as temporary carbon sinks? The economic impact of accounting methods on reforestation projects in the tropics*. Ecological Economics v.55, p.380– 394.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. EGELSTON S., BUENDIA L., MIWA K., TODD N., TANABE K. (EDITORES). 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Instituto de Estratégias Ambientais Globais (IGES) para o IPCC. Japão.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. METZ B., DAVIDSON O., CONINCK H., LOOS M. E MEYER L. (Editores). 2005. *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*. Editora da Universidade de Cambridge, Reino Unido, 431 p.

RESERVA DA BIOSFERA DA MATA ATLÂNTICA. Acesso dia 13 de outubro de 2008. http://www.rbma.org.br/anuario/mata_03_anosdedestruicao.asp

SILVER W.L., KUEPPERS L.M., LUGO A.E., OSTERTAG R., MATZEK V. 2004. *Carbon Sequestration and plant community dynamics following reforestation of tropical pasture*. *Ecological Applications* v.14(4), p.1115-1127.