

# METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DO ESTOQUE DE CARBONO: REVISÃO E ESTUDO DE CASO<sup>1</sup>

## *Methodology for Monitoring Carbon Stocks: a Review and Case Study*

Eric Bastos Gorgens<sup>2</sup>, Marcio Leles Romarco de Oliveira<sup>2</sup>, Helio Garcia Leite<sup>3</sup> e Manoel da Silveira Brum Neto<sup>4</sup>

**Resumo:** A crescente preocupação mundial com as alterações climáticas aumenta a pressão por utilização de atividades limpas. A prova disso é o surgimento do mercado para comercialização de créditos de carbono. Para tal, a determinação do estoque deve ser feita com critério e de preferência utilizando uma metodologia reconhecida internacionalmente. A UNFCCC/CCNUCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) aprovou em 2005 uma metodologia para monitoramento do estoque de carbono em florestas plantadas. Neste trabalho foi feita uma revisão sobre a metodologia aprovada, e um estudo de caso foi apresentado, utilizando parcelas permanentes de área variável (método de Bitterlich). Foram comparadas algumas práticas comuns na determinação do estoque de CO<sub>2</sub> com a metodologia aprovada.

**Palavras-chave:** estoque de carbono, monitoramento, CO<sub>2</sub>, crédito de carbono e florestas equiâneas.

**Abstract:** Pressure to use clean activities is increasing as a result of the worldwide concern with climatic changes which has brought about a market of carbon credits. Thus, stock determination must be carefully made, preferably using an internationally recognized methodology. The UNFCCC/CCNUCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) approved a methodology for monitoring carbon stock of even-aged forests in 2005. This work presented a review of the approved methodology and a case study using permanent sampling points. Some common practices to determine CO<sub>2</sub> stock were compared with the approved methodology.

**Keywords:** carbon stock, monitoring, CO<sub>2</sub>, carbon credit, even-aged forests.

## 1 INTRODUÇÃO

A contínua e crescente emissão de CO<sub>2</sub> vem sendo condenada e combatida por diversos governos e entidades sociais. Vários esforços vêm sendo feitos para minimizar essa questão. Dentre esses está a aprovação

do Protocolo de Quioto, no qual foi estabelecido que os países desenvolvidos reduziriam suas emissões de CO<sub>2</sub>.

Outro ponto muito importante, abordado pelo Protocolo de Quioto, é a comercialização de créditos de carbono. Assim, países e, ou,

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 28.3.2006 e aceito em 23.6.2006.

<sup>2</sup> Eng. Florestal, Pós-graduando em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 36570-000 Viçosa-MG, <e\_gorgens@yahoo.com.br>. <sup>3</sup> Prof. do Departamento de Engenharia Florestal – DEF/UFV. <sup>4</sup> Eng. Florestal, Celulose Nipo-Brasileira S.A. - CENIBRA.

empresas que ficaram abaixo de suas metas de lançamento de CO<sub>2</sub> poderão vender créditos para outras empresas ou para outros países que estejam acima de suas metas, balanceando, desta forma, as emissões e valorizando o esforço pela redução dos lançamentos.

A pressão mundial é tão grande, que mesmo países que oficialmente não fazem parte do Protocolo de Quioto vêm direcionando ações nesse sentido. Por exemplo, nos Estados Unidos já existem órgãos que gerenciam o comércio de títulos, ou créditos de carbono.

O Protocolo estabelece os métodos pertinentes para políticas de redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Entre esses está a captação de CO<sub>2</sub> pela vegetação. É nesse contexto que se inserem as empresas florestais. Dos ecossistemas, o florestal é o mais importante, devido à sua elevada capacidade de fixação de carbono (Figura 1).

De modo geral, a assimilação de carbono pelas plantas ocorre quando a produtividade primária líquida é superior à taxa de respiração. As espécies arbóreas se distinguem por seqüestrarem o carbono por décadas, armazenando-os na forma de madeira. No entanto, seu tempo de armazenamento e a quantidade estocada dependem da idade, do local de estocagem e do uso final da madeira.

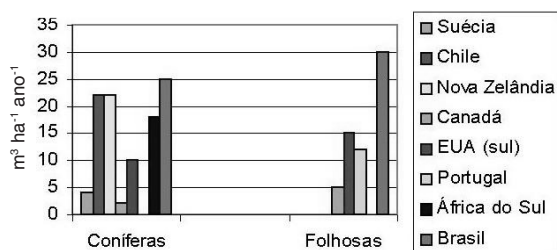
Quando a árvore atinge a maturidade, o balanço entre entrada e saída de carbono é praticamente nulo, servindo, a partir deste momento, apenas como local de armazenamento.

As conseqüências causadas por anos de altas emissões podem ser sentidas em todo o Planeta. A elevação da temperatura poderá ocasionar o aumento do nível dos oceanos e mudanças nos níveis de precipitação e nos climas locais (EPA, 2006).

A demanda por metodologias que quantifiquem o estoque de CO<sub>2</sub> em povoamentos

florestais vem crescendo nas empresas brasileiras. Diversos estudos vêm sendo orientados na mensuração do estoque tanto de florestas plantadas, quanto de florestas nativas tropicais.

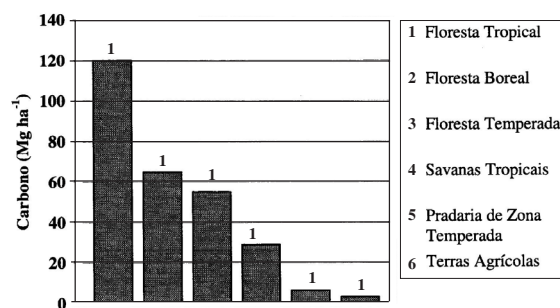
A floresta bem manejada é considerada uma fonte de energia limpa. O que ela emitirá num eventual uso, outrora captado da atmosfera, não contribui para o aumento da concentração de gases nocivos. No momento em que o povoamento tiver sido cortado para determinado uso, um novo será conduzido no mesmo local (Figura 2).



Fonte (Source): Adaptado de Garlipp (2001)

**Figura 1** - Produtividade de plantações florestais de coníferas e folhosas em alguns países do mundo.

**Figure 1** - Yield of different types of forest plantations in some countries in the world.



Fonte (Source): Adaptado de Schumacher et al. (2002).

**Figura 2** - Quantidade de carbono estocado acima do solo em determinados tipos de vegetação.

**Figure 2** - Carbon stock above ground in different vegetation types.

Este trabalho teve por objetivos revisar a metodologia aprovada pela UNFCCC/CCNUCC para monitoramento de carbono e mostrar um estudo de caso, utilizando parcelas de área variável. Durante o estudo de caso, algumas comparações foram feitas, a fim de demonstrar as conseqüências do uso incorreto da densidade da madeira.

## 2 METODOLOGIA

Para que os créditos de carbono possam ser comercializados, o correto monitoramento do estoque de carbono deve ser feito, seguindo uma metodologia reconhecida internacionalmente.

A metodologia aplicada neste artigo foi aprovada pela UNFCCC/CCNUCC, em 2005, e pode ser consultada na íntegra no endereço: [http://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/approved\\_ar.html](http://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/approved_ar.html).

Para monitoramento de estoques de carbono em sistemas florestais, os dados devem ser obtidos por processos de amostragem (inventário florestal). As parcelas devem ser permanentes, a fim de permitirem alta co-variância entre observações em sucessivas amostragens.

O dimensionamento do tamanho da amostra deve levar em consideração a variação da espécie, a precisão requerida (que gira em torno de 10% no Brasil) e o intervalo de monitoramento, respeitando sempre os princípios da amostragem, como a casualidade e a repetição.

Através do método BEF (*Biomass Expansion Factor*), coletam-se o diâmetro a 1,30 m do solo e a altura total de todas as árvores das parcelas permanentes superiores ao diâmetro mínimo. Para o ambiente tropical úmido, sugere-se que o valor seja de 10 cm. Deve-se estimar o volume das árvores com base em equações volumétricas, por exemplo, a de Schumacher e Hall (1933).

Pode-se utilizar também um método alternativo de obtenção de volume, como o do relascópio.

O modelo mais usado atualmente para determinação de volume de árvores individuais é o modelo de Schumacher e Hall (1933). Na equação 1 está sua forma linear.

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln DAP + \beta_2 \cdot \ln Ht + \varepsilon$$

em que  $\ln$  = logaritmo neperiano;  $Y$  = variável de interesse (volume em  $m^3 \text{ ha}^{-1}$ , biomassa em  $\text{kg ha}^{-1}$ );  $\beta_i$  = parâmetros do modelo, para  $i = 0, 1$  e  $2$ ;  $DAP$  = diâmetro a 1,30 m do solo, em cm;  $Ht$  = altura total das árvores, em m;  $\varepsilon$  = erro aleatório.

Estudos mostram que é possível ajustar modelos de árvores individuais para estimar diretamente o estoque de carbono por árvore. Soares et al. (2005) ajustaram modelos de Schumacher e Hall para povoamento do *Eucaliptus* sp. em uma determinada região de Minas Gerais, obtendo equações precisas.

Nesse caso, árvores devem ser cubadas, com representatividade em todas as classes de diâmetro. Discos de madeira devem ser coletados, seguindo a metodologia especificada em Vital (1984). Através desses discos determina-se a densidade básica da árvore, que deve ser obtida com bastante critério, pois varia ao longo do fuste e da posição medula-casca. Pode variar também de acordo com a idade, a taxa de crescimento, o desbaste e a latitude. Por fim, ajusta-se uma equação de árvores individuais, para obter o estoque de carbono.

Seguindo a metodologia proposta por UNFCCC/CCNUCC, o modelo de árvores individuais deve ser ajustado para volume. Após o cálculo de volume, faz-se a conversão em carbono, através da seguinte fórmula.

$$MC = V \times D \times CF$$

em que  $MC$  = massa de carbono ( $\text{kg ha}^{-1}$ );  $V$  = volume em metros cúbicos ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ );  $D$  = densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $CF$  = relação carbono-biomassa.

Quando não se tem a informação da quantidade de carbono para a espécie de interesse, o *INTERGOVERNMENTAL PANNEL*

ON CLIMATE CHANGE – IPCC (1996) recomenda o uso do fator 0,5 para converter biomassa seca em carbono.

Uma vez determinado o estoque de carbono de um povoamento em diversas idades (pelo menos três idades distantes, cerca de 12 meses entre cada uma), pode-se realizar um ajuste de modelo de crescimento e produção. Através deste, pode-se estimar a produção ao longo do horizonte de planejamento.

Poderão ser ajustados modelos de crescimento e produção tanto para volume e biomassa, quanto para carbono (SOARES et al., 2005). O modelo mais usado para construir curvas de produção em nível de povoamento é o de Clutter (1963).

$$\ln Y_2 = \beta_0 + \beta_1 \cdot I / I_2 + \beta_2 \cdot S + \beta_3 \cdot \ln B_2 + \varepsilon$$

$$\ln B_2 = \ln B_1 \cdot (I_1 / I_2) + \beta_4 \cdot (1 - I_1 / I_2) + \beta_5 \cdot (1 - I_1 / I_2) + \varepsilon$$

em que  $\ln$  = logaritmo neperiano;  $I$  = idade, em meses;  $I_1$  e  $I_2$  = idade presente e idade futura, respectivamente, em meses;  $B_1$  e  $B_2$  = área basal presente e área basal futura, respectivamente, em  $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ;  $S$  = índice de local, em metros;  $Y_2$  = variável de interesse no futuro;  $\beta_i$  = parâmetros do modelo, para  $i = 0, 1, 2, \dots, 5$ ; e  $\varepsilon$  = erro aleatório.

Soares et al. (2005) demonstraram que o modelo de crescimento citado mantém a coerência no que se refere à determinação do ponto de máximo incremento médio, quando a variável dependente é o estoque de carbono.

A árvore é analisada nas suas partes: aérea e radicular. A parte aérea é subdividida em copa e fuste. A copa é composta de folhas e galhos e o fuste, de madeira e casca. A estimação de estoques de carbono no fuste, na madeira e na casca é simples e trivial.

Embora existam diversos locais no qual o carbono está alocado, a metodologia da UNFCCC/CCNUCC (2005) só aprova a determinação de biomassa acima e abaixo do

solo. A biomassa abaixo do solo é obtida por uma relação entre esta e a parte aérea.

Em alguns casos, deseja-se ainda a informação sobre quantidade de  $\text{CO}_2$  fixado. Esse valor é determinado ao multiplicar o estoque de carbono por 3,67.

### 3 ESTUDO DE CASO

Ajustaram-se dois modelos de produção para dados obtidos de parcelas de área variável. Ambos possuem como variáveis independentes o *site* e a idade (PEREIRA, 2002).

O primeiro modelo ajustado teve como variável dependente o volume ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) e o segundo, a massa com casca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Obtidas as equações, geraram-se as respectivas curvas para  $\text{CO}_2$  fixado.

$$(\text{m}^3 \text{ha}^{-1}) \quad V = e^{5.589119295 - 1066.748692 (IS)^{-1}}$$

$$R^2 = 0,812$$

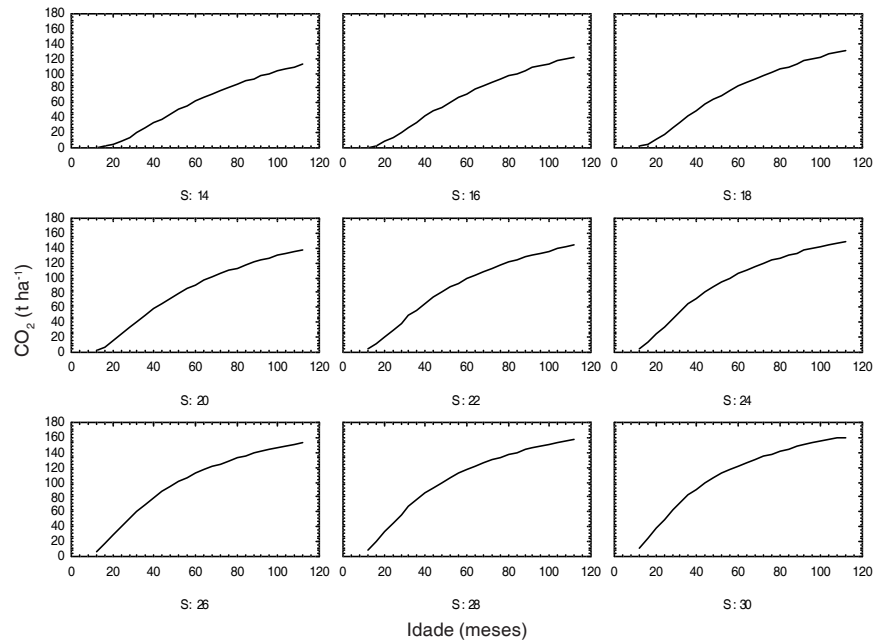
$$(\text{kg ha}^{-1}) \quad W = e^{11.63545007 - 1075.872856 (IS)^{-1}}$$

$$R^2 = 0,781$$

Multiplicando o volume, obtido através da equação, por uma densidade média ( $450 \text{ kg m}^{-3}$ ) obtém-se a massa em quilogramas (PEREIRA, 2002). A conversão dessa para carbono se dá através da multiplicação pelo fator 0,5. Por fim, o cálculo do  $\text{CO}_2$  fixado é feito utilizando o fator 3,67.

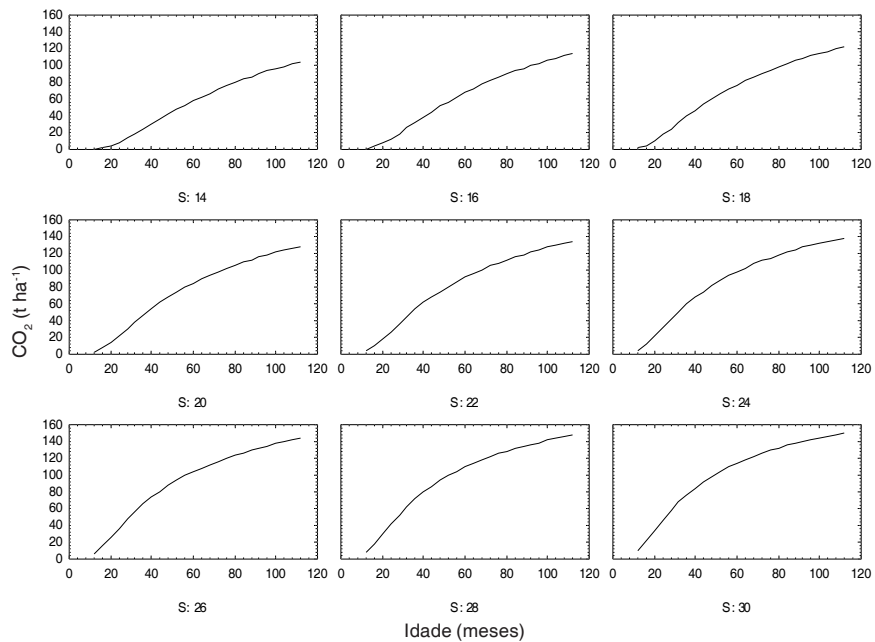
Ao utilizar um modelo que estime diretamente a massa, a conversão do volume através da densidade já está implícita. Desta forma, procede-se à obtenção do carbono e posteriormente do  $\text{CO}_2$  fixado, utilizando, para tanto, os fatores 0,5 e 3,67, respectivamente (Figuras 3 e 4).

Nota-se que ao converter o volume para  $\text{CO}_2$  através de uma densidade básica média, a tendência foi de superestimar o carbono fixado (Quadro 1).



**Figura 3** – Curvas de produção para fixação de CO<sub>2</sub>, geradas a partir da equação para estimar volume para diferentes índices de locais.

**Figure 3** – Carbon stock graphs using volume equation for different site indexes.



**Figura 4** – Curvas de produção para fixação de CO<sub>2</sub> geradas a partir da equação para estimar massa para diferentes índices de locais.

**Figure 4** – Carbon stock graphs using weight equation for different site indexes.

**Quadro 1** – CO<sub>2</sub> (t ha<sup>-1</sup>) fixado, estimado na idade de 7 anos para diferentes índices de local (S)

**Table 1** – Estimate of CO<sub>2</sub> (ton ha<sup>-1</sup>) captured at 7 years of age for different site indexes

S	Densidade 450	Equação de Massa
14	89,171087	83,086431
16	99,877482	93,152565
18	109,085771	101,817618
20	117,060000	109,326494
22	124,016065	115,880211
24	130,127516	121,640769
26	135,533391	126,738194
28	140,345391	131,277097
30	144,653772	135,342094

É aconselhável ajustar equações que estimem diretamente a massa, pois ela torna as estimativas menores suscetíveis a tendências (Quadro 2).

**Quadro 2** – Resultado médio de CO<sub>2</sub> (t ha<sup>-1</sup>) utilizando diferentes densidades médias (kg m<sup>-3</sup>) e a equação de massa, por idade (meses)

**Table 2** – Average stock of CO<sub>2</sub> (ton ha<sup>-1</sup>) using different densities (kg m<sup>-3</sup>) and weight equation per age (in months)

Idade	Densidade					Equação Massa
	350	400	450	500	550	
12	3,0211	3,4527	3,8843	4,3159	4,7475	3,5235
24	22,7823	26,0369	29,2915	32,5462	35,8008	27,0342
36	44,6760	51,0583	57,4406	63,8229	70,2052	53,3201
48	62,5623	71,4998	80,4373	89,3747	98,3122	74,8825
60	76,5695	87,5080	98,4465	109,3850	120,3235	91,8066
72	87,6095	100,1251	112,6408	125,1564	137,6720	105,1646
84	96,4569	110,2365	124,0161	137,7956	151,5752	115,8802
96	103,6741	118,4847	133,2953	148,1059	162,9164	124,6276
108	109,6588	125,3243	140,9898	156,6554	172,3209	131,8851

#### 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se uma abordagem da metodologia proposta pela UNFCCC/CCNUCC para monitoramento de carbono. Nota-se que esta já vem, de certa maneira, sendo aplicada em muitas empresas

florestais brasileiras que visam entrar no mercado de crédito de carbono. Deve-se seguir cuidadosamente a metodologia para obtenção das densidades, uma vez que influenciam diretamente as estimativas finais de estoque de carbono, ou CO<sub>2</sub>.

#### REFERÊNCIAS

BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of tropical forest: A new estimate based on forest volumes. **Science**, v. 223, p. 1290-1293, 1984.

BROWN, S.; LUGO, A. E.; CHAPMAN, J. Biomass of tropical tree plantations and its implication for the global carbon budget. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 13, p. 390-394, 1986.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 407 p.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.

COOPER, C. F. Carbon storage in managed forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 13, n. 1, p. 155-165, 1983.

GARLIPP, R. **Conclusões de marrakesh**. 2001. Disponível em: <www.sbs.org.br>. Acesso em: 17 mar. 2002.

HASENAUER, H. Princípios para a modelagem de ecossistemas florestais. **Revista Ciência & Ambiente**, n. 20, p. 53-69, 2000.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JR., 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: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. 125-153 p.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3.ed. Florida: Krieger Publishing Company, 1993. 402 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 1996 guidelines for national GHG inventories: Reference Manual. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm>. Acesso em: 20 jul. 2004.



PEREIRA, A. J. **Emprego do Método de Bitterlich em inventários florestais e em modelagem do crescimento e da produção.** 2002. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SCHROEDER, P. Carbon storage potential of short rotation tropical tree plantations. **Forest Ecology and Management**, v.50, p.31-41, 1992.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

SCHUMACHER, M. V. et al. Estoque de carbono em florestas de *Pinus teada* L. e *Acácia mearnsii* De Wild. Plantadas no estado do Rio Grande do Sul – Brasil. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono.** Curitiba: Imprensa universitária da UFPR, 2002. p. 141-152.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira.** Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1)