VALORAÇÃO DA TONELADA DE CARBONO SEQUESTRADO EM PLANTIOS DE EUCALIPTOS

ADRIANA TERESA BUSSONI GUITART

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Economia Aplicada.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo - Brasil

Outubro - 2003

ERRATA

Página 32, equação 19 onde se lê,

$$\frac{\sum_t^{T'} p^* \cdot \Delta C_{CO_2t} \cdot (1+r)^{T'-t} + \sum_{t=0}^{T'} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T'-t} - K_{fc,CO_2}}{[(1+r)^{T'} - 1]} = \frac{\sum_{t=0}^{T'} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T'-t} - K_{fc}}{[(1+r)^{T'} - 1]},$$

leia-se

$$\frac{\sum_t^{T'} p^* \cdot \Delta C_{CO_2t} \cdot (1+r)^{T'-t} + \sum_{t=0}^{T'} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T'-t} - K_{fc,CO_2}}{[(1+r)^{T'} - 1]} = \frac{\sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{fc}}{[(1+r)^{T''} - 1]}$$

Página 32, equação 20 onde se lê,

$$p^* = \frac{\sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{fc}}{[(1+r)^{T''} - 1]} \cdot \frac{[(1+r)^{T'} - 1]}{\sum_{t=0}^{T'} \Delta CO_2 \cdot (1+r)^{T'-t}} - \frac{\sum_{t=0}^{T'} P_{fc} \cdot V_t - K_{CO_2}}{\sum_{t=0}^{T'} \Delta CO_2 \cdot (1+r)^{T'-t}},$$

leia-se

$$p^* = \frac{\sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{fc}}{[(1+r)^{T''} - 1]} \cdot \frac{[(1+r)^{T'} - 1]}{\sum_{t=0}^{T'} \Delta CO_2 \cdot (1+r)^{T'-t}} - \frac{\sum_{t=0}^{T'} P_{fc} \cdot V_t (1+r)^{T'-t} - K_{CO_2}}{\sum_{t=0}^{T'} \Delta CO_2 \cdot (1+r)^{T'-t}}$$

Página	Item	Linha -parágrafo	Onde se lê	Leia-se
1	1	6 - 1º parágrafo	(Ciais, 2000).	(Ciais et al, 2000).
2	1	6 - 3º parágrafo	como	quanto
3	1	5 - 2º parágrafo	-(PCF, 2003)	(World Bank, 2003)
7	2	7 - 2º parágrafo	Gong (1998)	Gong & Kriströn (1998)
7	2	2,3,5,6,7 – 3º parágrafo	Mg C ⁻¹	Mg ⁻¹ C
7	2	7 - 3º parágrafo	(MVOTMA, 2002)	(Uruguay, 2002)
8	2	2 - 3º parágrafo	valorização	valoração
8	2	1 - 5º parágrafo	Plantinga	Plantinga et al
9	2	5 - 3º parágrafo	Gregersen	Gregersen et al
10	2	4 - 4º parágrafo	contata-se	constata-se
11	2	4 - 1º parágrafo	Lewis, 1996	Lewis et al, 1996
12	2	Quadro 1, coluna 3, linha 1	(US\$/ Mg-C ⁻¹)	(US\$ Mg ⁻¹ C)
12	2	Quadro 1, coluna 1, linha 4	Kundhlande (2000)	Kundhlande et al (2000)

Página	Item	Linha -parágrafo	Onde lê-se	Leia-se
12	2	Quadro 1, coluna 1, linha 5	Plantinga (1999)	Plantinga et al (1999)
12	2	Quadro 1, coluna 1, linha 9	Nordhaus (1990)	Nordhaus (1991)
13	2	Quadro 1, coluna 1, linha 2	Nordhaus (1990)	Nordhaus (1991)
15	3.1	6 - 2º parágrafo	O carbono retido num momento dado será a soma dos acúmulos líquidos	O carbono C retido num dado momento será a soma das variações líquidas ΔC_t nos
15	3.1	14	$C_t = \sum_{i=1}^n \Delta C_i$	$C_t = \sum_{i=1}^n \Delta C_i$ onde n= número total de períodos
16	3.1	1 - 1º parágrafo	poder-se	pode-se
18	3.1.1.1	2 - 2º parágrafo	não-lineal	não-linear
19	3.1.1.1	equação 8	0.38356	0,38356
20	3.1.1.2	10 - 1º parágrafo	do ano anterior	do ano 2001
23	3.1.1.2	2 - 2º parágrafo	da abscissa	do eixo
24	3.1.1.3	2 - 2º parágrafo	dos	nos
27	3.1.1.5	equação 9	$\frac{Celulose}{ha}$	$\frac{Volume (m^3)}{ha}$
27	3.1.1.5	4 - 2º parágrafo	Vital	Vital et al
27	3.1.1.5	5 - 2º parágrafo	Carvalho, 1996	Carvalho & Camargo, 1996
31		equação 16	$K_{fc,CO2} = \sum_{t=0}^T k_{fc,CO2} \cdot (1+r)^{T-t}$	$K_{fc,CO2} = \sum_{t=0}^T m_t \cdot (1+r)^{T-t}$ onde m_t é o custo de manejo, manutenção ou colheita no ano t do processo misto de produção.
32		equação 17	$NET_f = \frac{R_f - K_f}{[(1+r)^{T''} - 1]}$	$NET_{fc} = \frac{R_{fc} - K_{fc}}{[(1+r)^{T''} - 1]}$
32		equação 18	$K_{fc} = \sum_{t=0}^{T''} k_f \cdot (1+r)^{T''-t}$	$K_{fc} = \sum_{t=0}^{T''} m_t \cdot (1+r)^{T''-t}$ onde m_t é o custo de manejo, manutenção ou colheita no ano t do processo produção de celulose.
32	3.2	2 - 4º parágrafo	A equação (9)	A equação 21
34	3.2	1 - 2º parágrafo	equação 8	equação 20
40	4.2	3 - 2º parágrafo	um deslocamento para a direita na curva de oferta de carbono	uma mudança na curva de oferta de carbono em sítios de média produtividade.
41	4.2	1 - 1º parágrafo	madeira à inversa provoca um deslocamento para a esquerda	madeira por outro lado, provoca uma mudança
48	4.3	2 - 2º parágrafo	Gong, 1998	Gong & Kristön, 1998
48	4.3	2 - 2º parágrafo	Díaz Balteiro	Díaz Balteiro & Romero
48	4.3	2 - 2º parágrafo	Hoen	Hoen & Solberg
50	4.3	2 - 2º parágrafo	que poderia ser estar	que poderia estar

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Bussoni Guitart, Adriana Teresa

Valorização da tonelada de carbono sequestrado em plantios de eucaliptos /
Adriana Teresa Bussoni Guitart. - - Piracicaba, 2003.
69 p.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz,
2003.

Bibliografia.

1. Carbono 2. Economia ambiental 3. Eucalipto 4. Valor (economia) I. Título

CDD 338.1749734

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

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos professores Luiz Carlos pela orientação; a Alexandre, Pedro e Bacha, pela ajuda e conselhos. Ao professor José Stape, pela sua generosidade e ajuda. Também aos professores do mestrado Bento, Mírian e Roberto, pela disposição e amizade.

Aos meus amigos da turma e às amigas que agreguei: Janete, Marilândia e Maria do Carmo, pelas horas compartilhadas e amizade. À Cecília, Guillermo e a seus filhos Anita e Bernardo, pela atenção, afeto e ambiente de família; à Beatriz e Jesús, pela amizade; a Marichu a Noemi, pelas horas compartilhadas A Jefferson, do Departamento de Engenharia Florestal, pela camaradagem .

A todos os colegas do Departamento de Ciencias Sociales da Facultad de Agronomía, Montevideo, pelo trabalho extra na minha ausência. A Juan do Departamento Florestal.

A Ruben, pela ajuda sem a qual não poderia ter feito meus estudos.

Dedico esta dissertação às minhas filhas Ana Clara e Juana Ines.

À memória dos meus avós Clara e Juan.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	xi
SUMMARY	xiii
RESUMEN	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O PROBLEMA	5
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 HIPÓTESES	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	6
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 FORMAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO	14
3.1.1 ESTUDO DE CASO	17
3.1.1.1 MODELO BIOMÉTRICO	17
3.1.1.2 DETERMINAÇÃO DA LINHA BASE	20
3.1.1.3 SOLO	24
3.1.1.4 CUSTOS DE PRODUÇÃO	25
3.1.1.5 RECEITAS	27

3.1.1.6 UNIDADE DE MEDIDA	27
3.1.1.7 MERCADO DA CELULOSE	28
3.1.1.8 TAXA DE DESCONTO	29
3.2 DETERMINAÇÃO DO VALOR P^*	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 VALOR DA TONELADA DE CARBONO	35
4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	39
4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	49
ANEXOS	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Ciclo do carbono desde a biomassa florestal até o lançamento à atmosfera.....	14
2 O carbono após a colheita.....	16
3 Carbono seqüestrado acima da linha base	23
4 Evolução taxa libor semestral.....	29
5 Oferta de bióxido de carbono equivalente	38
6 Oferta de bióxido de carbono equivalente, incluindo sequestro inferior à linha base	39
7 Comportamento da oferta de carbono em diferentes sítios ante variações do preço da celulose.	41
8 Sensibilidade preço de carbono à taxa de juros e preço da celulose	44
9 Oferta de carbono e taxa de juros. Sítios de média produtividade.	44
10 Oferta de carbono e taxas de juros. Sítios de alta produtividade.....	45
11 Custo marginal de abatimento em sitios de alta e média produtividade.	46
12 Acúmulo de biomassa em partes da árvore. Sítios de média produtividade	54

13	Acúmulo de biomassa em partes da árvore. Sítios de alta produtividade	54
14	Oferta de carbono preço da celulose. Sítio de média produtividade.	61
15	Oferta de carbono preço da celulose. Sítio alta produtividade.	62
16	Tendencia do valor do carbono ante variações no preço da celulose e taxa de desconto em sítios de media produtividade.	62
17	Tendencia do valor do carbono ante variações no preço da celulose e taxa de desconto em sítios de alta produtividade.	63

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Carbono em compartimento de biomassa. Sítios de alta produtividade.	21
2 Carbono em compartimento de biomassa. Sítios de média produtividade.	21
3 Valor econômico da terra.	24
4 Custos de produção correntes de eucalipto.	25
5 Valor da tonelada de carbono líquido retido. Sítios de média produtividade. ...	36
6 Valor da tonelada de carbono líquido retido. Sítios de alta produtividade.	37
7 Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 11 anos.	40
8 Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 11 anos.	40
9 Seqüestro marginal de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade 11 anos.	42
10 Seqüestro marginal de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade 11 anos.	42
11 Elasticidade-preço da oferta. Sítio de media produtividade.	43
12 Elasticidade-preço da oferta. Sítio de alta produtividade.	43

13	Cálculo da renda potencial ambiental.	46
14	Parâmetros da função Gompertz para casca e lenho. Sítios de alta e média produtividade.	52
15	Parâmetros para determinação de galhos.	53
16	Parâmetros para determinação de raízes.	53
17	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 7 anos.	55
18	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 7 anos.	55
19	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 8 anos.	55
20	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 8 anos.	55
21	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 9 anos.	56
22	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 9 anos.	56
23	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 10 anos.	57
24	Valor tonelada de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 10 anos.	57
25	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 7 anos.	57

26	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade 7: anos.	58
27	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade 8: anos.	58
28	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 8 anos.	58
29	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 9 anos.	59
30	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 9 anos.	59
31	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 10 anos.	59
32	Seqüestro adicional de carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e há}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 10 anos.	60

VALORAÇÃO DA TONELADA DE CARBONO SEQUESTRADO EM PLANTIOS DE EUCALIPTOS

Autora: ADRIANA TERESA BUSSONI GUITART

Orientador: Prof. Dr. LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ

RESUMO

A partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, previsto no acordo de Quioto, países com superfícies florestais poderão emitir Certificados de Redução de Emissão concedidos pela quantidade de Bióxido de Carbono Equivalente (CO₂-e) abatida numa área florestal determinada. Neste trabalho, propõe-se um modelo de avaliação de CO₂-e a partir do Valor da Terra de Faustmann. Calcula-se o valor mínimo de recompensa para manter a biomassa florestal em pé, o que permite estabelecer a oferta potencial de abatimento de carbono. A partir de um estudo prévio feito de Stape (2002) em florestas de eucalipto no Nordeste de Brasil (Bahia), determinaram-se para dois sítios florestais a oferta de abatimento de CO₂-e acima da linha-base. Os valores médios obtidos foram de US\$ 8,16 Mg⁻¹ CO₂-e e US\$ 7,19 Mg⁻¹ CO₂-e para sítios de média e alta produtividade, respectivamente. Sítios mais produtivos resultaram numa oferta de abatimento de carbono maior: considerando a rotação a 11 anos, os sítios de média produtividade podem reter 34 Mg CO₂-e ha⁻¹ a um preço de US\$ 16 Mg⁻¹ CO₂-e, frente aos sítios de alta produtividade, que podem reter 80 Mg CO₂-

e ha^{-1} a um preço de US\$ 14 Mg^{-1} $\text{CO}_2\text{-e}$. A elasticidade preço da oferta é, para os dois sítios, inelástica e crescente à medida que a rotação dista do ótimo econômico: 0,24 e 0,27 para idades de 11 anos em sítios de média e alta produtividade, respectivamente. Isso estaria determinado pelo limite biológico na produção de biomassa, além do qual um aumento no preço não determina de maneira proporcional a oferta de carbono. O modelo proposto de valoração do serviço ambiental poderia ser adequado para determinar, da perspectiva privada, a oferta potencial de florestas com um custo de oportunidade econômico na ausência de mercados desenvolvidos. Porém, não se adapta a florestas com baixo valor comercial.

VALUATION OF SEQUESTERED CARBON TON IN EUCALYPTUS PLANTATIONS

Author: ADRIANA TERESA BUSSONI GUITART

Adviser: Prof. Dr. LUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ

SUMMARY

Approval of the Clean Development Mechanism, provided for in the Kyoto Protocol will enable countries with afforested land to trade carbon emissions reduction certificates related to Carbon Dioxide Equivalent Quantities (CO₂-e) stored within a certain forest area. This study suggests a calculation model of the minimum value of the sequestered ton of carbon to be paid to the pulpwood grower producer, which justifies the adoption of new management practices.

Potential CO₂-e above base lines sequestration was determined for two forest sites from previous work by Stape (2002) on commercial eucalypt plantations in Northern Brazil (Bahia). Compensation values for silvicultural regimes involving rotation lengths higher than economically optimal were based on land expectation values computed using the Faustmann formula. Mean values obtained were US\$ 8.16 Mg⁻¹ CO₂-e and US\$ 7.19 Mg⁻¹ CO₂-e for average and high site indexes, respectively. More productive sites resulted in higher storage potentials; extending rotation to 11 years in average-quality sites may produce storage values of 34 Mg CO₂-e ha⁻¹, at a price of US\$ 16 Mg⁻¹ CO₂-e, in contrast with highly productive sites, where sequestration can reach 80 Mg CO₂-e ha⁻¹, at a price of US\$ 14 Mg⁻¹ CO₂-e. For both sites, price elasticity of supply

was found to be inelastic and increasing as rotation length moves further away from economically optimal values: 0.24 and 0.27 for age 11 years in average and high-productivity sites, respectively. This would be due to biomass production potential as a limiting factor; beyond a certain threshold value, an increase in price does not sustain a proportional change in carbon storage supply. The environmental service valuation model proposed could be adequate for assessing potential supply in plantation forestry, from a private landowner perspective, with an economic opportunity cost and in the absence of a developed trading market. The model is not, however, applicable to low commercial value forest plantations.

VALORACIÓN DE LA TONELADA DE CARBONO SECUESTRADO EN PLANTACIONES DE EUCALIPTOS

Autora: ADRIANA TERESA BUSSONI GUITART

Orientador: Prof. Dr. YLUIZ CARLOS ESTRAVIZ RODRIGUEZ

RESUMEN

Desde la implementación del Mecanismo de Desarrollo Limpio, previsto en el Protocolo de Kyoto, países con superficies forestales podrán emitir Certificados de Reducción de Emisiones atribuibles a la cantidad de Dióxido de Carbono Equivalente ($\text{CO}_2\text{-e}$) abatidos en un área forestal determinada. Se propone un modelo de cálculo del valor mínimo de la tonelada de carbono secuestrada a ser pago al productor de fibra celulosa que justifica la adopción de nuevos regímenes de manejo. A partir de un estudio previo hecho por Stape (2002) en plantaciones comerciales de eucalipto en el norte de Brasil (Bahia), se determinaron para dos sitios forestales la oferta de abatimiento de $\text{CO}_2\text{-e}$ por encima de la línea base. Se utilizó el Valor Esperado de la Tierra de Faustmann para calcular el valor de compensación de regímenes forestales con edades de corte fuera del óptimo económico. Los valores promedio obtenidos fueron de US\$ 8,16 $\text{Mg}^{-1} \text{CO}_2\text{-e}$ y US\$ 7,19 $\text{Mg}^{-1} \text{CO}_2\text{-e}$ para sitios de media y alta productividad respectivamente. Sitios mas productivos resultaron en una oferta de abatimiento de carbono mayor: llevando la rotación a 11 años los sitios de media productividad pueden retener 34 $\text{Mg CO}_2\text{-e ha}^{-1}$ a un precio de US\$ 16 $\text{Mg}^{-1} \text{CO}_2\text{-e}$, frente a sitios de alta

productividad que pueden retener $80 \text{ Mg CO}_2\text{-e ha}^{-1}$ a un precio de US\$ $14 \text{ Mg}^{-1} \text{ CO}_2\text{-e}$. La elasticidad precio de la oferta es, para los dos sitios, inelástica y creciente a medida que la rotación se aleja del óptimo económico: 0,24 y 0,27 para edades de 11 años en sitios de media y alta productividad respectivamente. Esto estaría determinado por la limitante biológica en la producción de biomasa mas allá de la cual, un aumento de precio no determina de manera proporcional la oferta de carbono. El modelo propuesto de valoración del servicio ambiental podría ser adecuado para determinar, desde la perspectiva privada, la oferta potencial de plantaciones forestales con un costo de oportunidad económico y en ausencia de mercados desarrollados. Sin embargo no se puede aplicar a plantaciones forestales con bajo valor comercial.

1 INTRODUÇÃO

Existe uma crescente conscientização na sociedade sobre os potenciais problemas ambientais derivados do aquecimento global. Este aquecimento está atrelado ao aumento dos Gases de Efeito Estufa (GEE)¹, cuja emissão iniciou-se com o processo de industrialização no século XIX. As consequências desse aumento de temperatura podem ir desde o desaparecimento de certas atividades produtivas até o risco de extinção de algumas espécies (Ciais, 2000). Mesmo nos cenários mais otimistas, as mudanças climáticas podem provocar prejuízos em diversas cadeias de produção do setor agrícola, com fortes impactos nas economias em desenvolvimento, que dependem em grande medida do setor primário.

A comunidade internacional vem tentando estabelecer um compromisso que proporcione uma redução nas emissões dos GEE. Com este intuito, em 1997, foi redigido o Protocolo de Quioto e teve início a negociação das principais vias de redução dos GEE dos maiores países poluentes. Em seu artigo 12, o Protocolo propõe o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) como alternativa para a redução das emissões de CO₂.

O MDL permite que governos ou entidades privadas em países industrializados recebam créditos gerados por projetos redutores de emissões implementados em países em desenvolvimento. Os créditos são emitidos na forma de Redução de Emissão Certificada – CER (Certified Emissions Reductions). Esta solução aplica o princípio de Pigou (Romero, 1994), no qual um órgão central determina um nível socialmente ótimo de poluição, estabelecendo as quantidades que serão mitigadas e tenta atingir um nível

¹ Os GEE são: Bióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O) e os Cloroflúor Carbonatos (CFC).

de externalidade Pareto eficiente. Neste ponto, nenhum dos agentes poderia trocar de posição e sair favorecido sem prejudicar o outro agente; partindo de uma dotação inicial de recursos, essa é a melhor solução a arribar para os agentes envolvidos. O tamanho do mercado de redução de emissões, no primeiro período de compromisso de reduções (2008-2012) que possam ser atribuídas pelas atividades florestais, é calculado entre 350 e 686 Mton CO₂ (Uruguay, 2002). Porém, é esperado que essas quantidades aumentem à medida que os países acordem reduções crescentes de emissões nas suas economias e tentem transferir para outros agentes econômicos suas obrigações.

A elegibilidade dos usos da terra, de mudanças no uso da terra e de projetos de florestamento (LULUCF) citados no o artigo 12 do Protocolo está limitada às atividades de florestamento e reflorestamento no primeiro período de compromisso de redução dos GEE acordado pelas partes. Atividade de florestamento é a mudança ou conversão, induzida pela atividade humana, de terras não florestadas por um período mínimo de 50 anos em terras florestadas, mediante plantação, semeio ou indução de fontes de semente natural. Reflorestamento, por sua vez, é a conversão, também pela atividade humana direta, de terras não florestadas em terras florestadas através do plantio de mudas, sementes ou estímulo à produção de sementes de origem natural em terras onde anteriormente houve florestas, mas atualmente estão desflorestadas.

No primeiro período do compromisso, atividades de reflorestamento estão limitadas às terras sem florestas na data do 31 de dezembro de 1989. As negociações internacionais, até agora conduzidas para definição do MDL, ainda não consideram elegível o eventual seqüestro de carbono induzido pela mudança no manejo de florestas já existentes. Entretanto, como será ilustrado neste trabalho, as mudanças no manejo podem alterar o estoque de carbono, tanto nas florestas como nos produtos derivados das mesmas.

As mudanças no manejo florestal que promovam ou levem à produção de bens finais duráveis, no caso de florestas implantadas, e à diminuição da taxa de desmatamento, no caso de florestas nativas, geram um aumento do estoque de carbono em relação à situação original destas florestas ou linha-base. Essas mudanças de manejo

poderiam ser tão ou mais convenientes, sob perspectivas ambiental e econômica, que outras políticas de mitigação.

Para o caso da produção de um bem de mercado em concorrência perfeita, o preço desse bem reflete o custo de oportunidade dos fatores de produção envolvidos. O mercado de carbono registra transações onde se declaram valores em projetos ambientais de US\$ 1 Mg⁻¹ C estocado em florestas na Bolívia até US\$ 22 Mg⁻¹ C em florestas no Brasil (PCF, 2003). Essa variabilidade de preço, no mercado incipiente de carbono, levanta a pergunta de quanto vale o carbono estocado para o dono da floresta e quanto deveria ser a recompensa para incluir na função de produção da empresa o objetivo ambiental de seqüestro de carbono.

Este trabalho propõe uma valoração do carbono retido em florestas implantadas sob o ponto de vista privado que determina o valor de compensação por manter a biomassa seqüestradora de carbono em pé.

Considerou-se um estudo de caso em florestas de eucalipto no estado da Bahia, a partir de pesquisa prévia feito por Stape (2002). Emprega-se uma metodologia de valoração que inclui a principal atividade econômica destas florestas: a produção de celulose. Não se considerou dentro dos custos de produção os custos de monitoramento e certificação, que deverão ser incluídos numa posterior avaliação de projeto ambiental.

Se, por um lado, os ecossistemas florestais são locais onde se armazena a fração de carbono terrestre mais importante, por outro, também produzem matérias-primas para a indústria, o que tem o efeito de reter carbono nos seus produtos por um determinado tempo. Da colheita florestal, estima-se que entre 50% e 70% da quantidade de matéria-prima é destinada a produtos derivados. O fluxo anual mundial de colheita florestal é de aproximadamente 1,6 bilhão de m³, dos quais destina-se um fluxo bruto de carbono para os produtos de aproximadamente 300.000 Mg C ano⁻¹ (Watson, 2000).

Plantios florestais que resultem em diferentes produtos, como papel e madeira para serraria, retêm carbono em forma adicional que deveria ser considerado no fluxo líquido de carbono dos projetos ambientais. Para uma adequada avaliação do carbono retido, é necessária informação que o quantifique durante as diferentes fases do produto após sua obtenção: vida útil, percentil reciclado, deposição, aterro e queima. As ações

que adicionem o tempo de carbono nos produtos ou no ciclo florestal levam a efeitos benéficos sobre o fluxo líquido. Assim, atividades que elevem as taxas de reciclagem, alonguem a vida dos produtos e modifiquem o tempo das rotações em função da biomassa gerada aumentam a quantidade de carbono no balanço do ciclo total de carbono que deveria-se incorporar nos projetos ambientais.

A inclusão de determinadas atividades a serem consideradas como MDL é uma questão polêmica, que requererá um debate e um acordo das partes envolvidas no Protocolo. Isso determinará como países com importantes superfícies de florestas naturais e implantadas, como é o caso do Brasil e outros países, poderão se beneficiar dos acordos internacionais que venham a seguir após essas negociações.

Atualmente, no Brasil, existe uma gama de projetos propostos para serem elegíveis pelo MDL e poderem vender os CER, bem como projetos em etapa de implementação com a finalidade de acreditar CER no futuro. Destacam-se o projeto Plantar, em Mina Gerais, com o objetivo de substituir carvão mineral pelo carvão vegetal de plantações de eucaliptos; o Projeto de Manejo de Babaçuais, em Carajás, para produção de biomassa e suscitação de carvão mineral; Plantação de Teca em Mato Grosso; Plantação de Seringueira no mesmo estado e o Projeto de Agroindústria Canavieira, que propõe reduzir a porcentagem da área de cana queimada bem como substituir combustíveis fósseis na etapa de agroindústria (Rocha, 2003). Salienta-se que alguns desses projetos estão sendo comercializados no *grey market*, mercado que funciona paralelamente da implementação da legislação do MDL nos respectivos países (Rocha et al., 2002).

1.1 O problema

Apesar de justificável a criação de um mecanismo que remunere a adoção de projetos florestais de seqüestro de carbono, desconhece-se o valor mínimo que deveria ser pago a cada tonelada de carbono a mais estocada pela floresta, que justifique mudanças no atual sistema de produção.

1.2 Objetivos

Propor um método de cálculo do valor mínimo da tonelada de carbono seqüestrada que deveria ser pago ao produtor de fibra de celulose que justifica a sua opção por novos regimes de manejo, que além da fibra também agrega carbono fixado no balanço líquido final desse elemento.

1.3 Hipóteses

Um grande número de plantios de eucaliptos no Brasil é cultivado para a produção de matéria-prima para a indústria de celulose. Os gestores procuram, para um horizonte de planejamento suficientemente longo, ordenar a produção e maximizar os retornos aos investimentos nesses plantios.

Pressuposição: Existe um valor p_{CO_2} que adequadamente remunera o gestor de plantios florestais pelo benefício por ele gerado ao adotar regimes de manejo que aumentam o estoque médio de carbono seqüestrado.

Hipótese: Então, deve existir um valor p^* que torna indiferente para esse gestor, do ponto de vista financeiro, manter o atual regime de manejo ou optar por regimes de manejo que aumentam o nível de carbono seqüestrado, o qual poderia ser usado como preço mínimo de referência para justificar a mudança para o uso de manejo com maior capacidade de seqüestro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

As avaliações das formas mais competitivas de seqüestro estão ligadas a modelos setoriais e energéticos. Nordhaus (1991) faz uma extensa revisão de diferentes enfoques sobre a determinação de custo marginal. Kram et al., citados por Nordhaus, determinam custos para uma tecnologia de baixa emissão de CO₂, resultando em custos de abatimento de US\$ 55-120 Mg⁻¹C. Aquele autor faz uma revisão de modelos energéticos ampliados para CO₂ e simula impactos de políticas relativas a emissões. Como resultado, apontam que os valores eficientes de impostos aplicados a CO₂ para se obter 50% de redução é US\$ 430 Mg⁻¹C. Nordhaus assinala que o custo marginal de redução de CO₂ como uma porcentagem de redução da linha-base é o mesmo que aplicar um imposto uniforme à redução de carbono. O mesmo princípio de imposto e subsídio é usado por Romero et al. (1998) para florestas.

Em termos globais, Nordhaus avalia três mecanismos: baixar a taxa de desmatamento de florestas tropicais, florestar terras abertas aumentando a quantidade de C estocado e programas de conservação de árvores que se mantenham indefinidamente em pé, armazenando C. A opção de florestamento em terras abertas é considerada uma opção de conveniência moderada, empregando-se taxas de fixação globais num programa de 75 anos de duração. O trabalho calcula os custos de seqüestro entre US\$ 42 e 114 Mg⁻¹C. Este estudo leva em conta uma única função de fixação de C em nível mundial, não considerando as diferentes potencialidades das florestas, que dependem da espécie, da classe de idade e do potencial do sítio e manejo.

Dentre os trabalhos que estimam custos de abatimento especificamente para florestas, destaca-se a contribuição de Díaz Balteiro & Romero (2001) que consideram o preço do carbono como o equivalente de subsídio que torna igual o ótimo privado ao

ótimo ambiental. O ótimo privado se atinge no ponto em que o Valor Presente Líquido gerado pela floresta é máximo; já o ótimo ambiental é aquele ponto onde a produção de biomassa é máxima. Dessa forma, níveis de seqüestro de carbono superiores atingem níveis de subsídio maiores.

Na metodologia proposta por Romero et al. (1998), concede-se uma compensação na forma de subsídio por tonelada de carbono retido e um imposto por tonelada de carbono liberado. Não se considera o fluxo de carbono no solo e o carbono retido nos produtos. A presença de uma externalidade gera uma divergência entre o ótimo privado e o social, derivando numa ineficiência em termos do ótimo de Pareto. Esta pode ser superada via subsídio, o que permite igualar ambos níveis ótimos. Na mesma linha está o trabalho de Gong (1998), que estuda, de uma perspectiva privada, a rotação ótima numa floresta que produz madeira e carbono, através de um esquema de subsídio pelo qual o dono da floresta se dispõe a mudar para uma rotação que o aproxime do ótimo social. A função-objetivo é maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) composto pelas receitas líquidas da colheita florestal e dos subsídios.

Para Brasil, com base no trabalho de Rocha (2003), podem se deduzir valores de seqüestro de carbono que variam desde US\$ 0,47 Mg C⁻¹, no projeto de plantação da palmeira Dendê, no Pará, para rotação perpetua, até US\$ 20 Mg C⁻¹, no projeto de plantação de Teca numa rotação de 30 anos. Para plantações florestais, Amaral (1999) calcula valores entre US\$ 2 e 5 Mg C⁻¹ em rotações de 10 anos. Os valores documentados para o Uruguai são de US\$ 10 Mg C⁻¹, para plantações de eucalipto e pino, e de US\$ 6,15 Mg C⁻¹, para projeto florestal combinado com gado (MVOTMA, 2002).

Alguns autores não descontam o fluxo de carbono ao longo do tempo (Moulton & Richards, 1990), o que dá maior peso às quantidades de carbono emitidas e retidas mais distantes no tempo, criando-se uma distorção. A esse respeito, Fearnside (1995) comenta que uma taxa zero de desconto introduz distorções temporais. Uma taxa positiva inclui a preferência temporal positiva no abatimento, o qual é desejável tanto do ponto de vista ambiental como de uma perspectiva privada. Já Plantinga et al. (1999) e Stavins & Nordhaus (1999) expressam a quantidade de carbono valorizada como valor

descontado de forma relativa aos custos presentes normalizados. Assim, os custos por unidade de carbono seqüestrado podem ser comparados com outras alternativas tecnológicas de mitigação.

Creedy & Wurzbacher (2001) examinam as estratégias para uma floresta que produz água, madeira e carbono, aplicando o modelo de múltipla rotação de Faustmann (1849). Os benefícios de seqüestro de carbono se modelam como acumulação total da biomassa em pé e seu potencial de seqüestro se alcança quando os talhões atingem o máximo de biomassa. A estrutura de idade está entre os fatores que mais influenciam a capacidade de armazenamento de carbono, pois a quantidade de carbono armazenada será menor quanto mais curta for a rotação. No trabalho, estima-se o valor da tonelada de carbono entre US\$ 3,93 e 250

Mg⁻¹C. O estudo ignora os retornos por polpa, pois a principal entrada de madeira provém das toras. O valor de seqüestro de carbono é determinado a partir da estimativa do preço-sombra de seqüestrar carbono utilizando outros tipos de tecnologia, mas esta ignora o custo de oportunidade do dono da floresta.

Outros estudos valoram a tonelada de carbono seqüestrada com base na valorização feita a partir de uma função de dano social (Kundhlande et al., 2000). O valor de uma atividade que reduz a concentração de CO₂ na atmosfera é obtido como o valor de carbono seqüestrado vezes o custo do dano causado por uma tonelada adicional de CO₂ relançada na atmosfera.

Plantinga (1999) estuda florestas em três estados dos EUA, assumindo como custo de oportunidade a renda agrícola dessas terras. Conclui que os custos de seqüestro do carbono variam entre US\$ 75 e 120 Mg⁻¹C, o que considera atrativo frente ao custo de introduzir tecnologias de produção alternativas para reduzir as emissões de carbono, as quais, calcula o autor, têm custos de US\$ 100 a 900 Mg⁻¹C. Este autor propõe a opção de colher madeira com um destino de bens duráveis, como móveis, que praticamente não liberaria CO₂ na atmosfera. Estima-se que a parte colhida para polpa é devolvida à atmosfera em maior quantidade de CO₂, através da energia adicional usada em sua fabricação, expressando o fluxo de C armazenado como valor presente. Outros estudos obtêm resultados opostos quanto ao carbono no processo de produção de fibra

celulose, com um balanço líquido de $+0,56 \text{ Mg}^{-1}\text{C}$ por cada tonelada de papel produzido, incluindo, no balanço, a etapa de plantação florestal até os produtos finais derivados (Young, 2000).

Adams et al. (1999) determinam os custos de atingir metas de seqüestro de C como perdas de bem-estar nos mercados florestais e agrícolas sob diversos cenários. Esses autores estimam os custos e a mudança líquida no excedente dos consumidores e produtores em mercados de *commodities* agrícola e florestal. Identificam também as melhores combinações de manejo para se atingir o custo social mínimo utilizando um modelo no qual os mercados florestal e agrícola estão ligados pelo mercado da terra. Inventários privados florestais são modelados usando-se uma estrutura linear e o modelo tipo II de Johnson & Scheurmann (1977).

Larrobla (1998) analisa alternativas produtivas que supõem uma reconversão da pecuária para florestas em ciclos de 40 anos. O valor para a bonificação é definido como o custo de oportunidade determinado pelos benefícios líquidos da atividade produtiva anterior ao projeto. Este valor de uso ambiental se determina utilizando preços do mercado, o que permite estabelecer o valor mínimo para o serviço ambiental (Gregersen, 1997).

Um outro enfoque no valor da bonificação é a Programação Multicritério utilizada por Romero (1996), que considera o seqüestro de carbono como um bem público que gera uma divergência entre o ótimo social e o ótimo privado. Esta divergência se dá entre o dono da floresta que produz madeira e a demanda social de manter a floresta em pé. O autor desenvolve uma metodologia para determinar a idade ótima de rotação num contexto de múltiplos usos para levantar a contradição dos ótimos. As medidas em unidades monetárias, de acordo com o autor, não poderiam ser utilizadas, pois torna-se muito difícil a valoração monetária de um bem público como o armazenamento de CO_2 na biomassa floresta. A não inclusão na função de produção no serviço ambiental leva a uma oferta sub-ótima por parte do agente privado.

Na mesma linha, Van Kooten et al. (1995), num modelo de longo prazo de gestão de florestas para fixação de CO_2 , estabelecem uma fronteira de possibilidades de produção entre o VPL da madeira produzida e a captura de CO_2 . A idade de rotação

ótima está dada pela otimização de uma função de utilidade com dois argumentos: madeira e CO₂ sobre uma curva de Possibilidades de Produção ou Curva de Transformação.

Hoen & Solberg (1994) mensuram o custo marginal de capturar CO₂ numa floresta como a mudança no VPL. O custo marginal da redução de CO₂ atmosférico é avaliado como a redução no VPL em madeira que temos que aceitar para aumentar a quantidade de carbono fixado. O desenvolvimento dos preços relativos ligados a reduções marginais de CO₂ dependerá das expectativas sobre o futuro. O custo marginal de incrementar o VPL de CO₂ é definido como o decréscimo em volume de madeira que será obtido quando essa parte da floresta for manejada com outro regime.

Lewis et al. (1996), por sua vez, projetam os custos de quatro cenários florestais. No inventário florestal existem dois procedimentos de fixação de carbono: a conservação de C via estoque florestal, e o respectivo acréscimo ao Estoque de Capital, e a fixação de C a partir do crescimento florestal e fluxo de incremento de capital. O custo do fator capital é incluso tanto para a terra como para o crescimento do estoque. O custo total se compõe do custo da renda da terra, que é a resultante do custo de oportunidade real, e da taxa de desconto real a longo prazo. Também se incluem o custo do crescimento de estoque e os custos anuais, descontado à valor anual do crescimento. O custo total se determina como o custo de oportunidade da terra ou Renda mais o custo do crescimento de estoque e custos de administração. Esse procedimento se adapta para escalas regionais, mas tem como limitante a não identificação do regime ótimo, além de que as alternativas de manejo são comparadas baseadas em eficiência relativa.

Esses autores analisam as limitações da metodologia de Custo-Benefício destacando a incapacidade de expressar totalmente o Benefício Marginal de manejar a floresta com um determinado regime, bem como a combinação dos benefícios obtidos. Com isso, contata-se a limitação da análise de Recursos Ambientais na ausência de mercados desenvolvidos.

Os efeitos obtidos na simulação de programas de conversão de terras agrícolas para a atividade florestal com o objetivo de seqüestro de carbono, como em Plantinga (1999) e De Jong (2000), levaram em conta que o valor da renda da terra representa a

opção das outras atividades não florestais como agricultura. No caso de terras destinadas para a atividade florestal, isso seria representado pela renda possível na ausência da atividade seqüestro de carbono. O custo de oportunidade da terra é freqüentemente considerado nos trabalhos através do mercado da terra (Lewis, 1996; Moulton & Richards, 1990). Ainda que o mercado da terra reflita em alguma medida o potencial do ativo econômico, muitas vezes o comércio de terras acaba sendo influenciado por outras variáveis, como a especulação, não expressando adequadamente o potencial produtivo. A esse respeito, Fearnside (1995) aponta a dificuldade de determinar um preço de oportunidade para a terra no Brasil com base em valores de mercado. O custo do seqüestro de carbono se calcula como fluxo de produtos da floresta que deixaram de ser produzidos na ausência do projeto.

Nesta dissertação, o custo de oportunidade da terra é incluído a partir da atualização de todas as rendas futuras florestais. Isso elimina o fator especulativo contido no valor de mercado e permite um cálculo mais aproximado do valor de seqüestro da tonelada de carbono. Feng (2002) salienta que custos derivados de projetos calculados com diferentes períodos de estudo podem inviabilizar a comparação dos resultados.

No Quadro 1 se resumem as principais formas de valoração e características encontradas nos trabalhos revisados.

Autor	Tipo de Custo	Valor de carbono (US\$/ Mg·C⁻¹)	Característica
Creedy & Wurzbacher (2001)	Preço-sombra de seqüestrar carbono usando outras tecnologias	3,93-250	Só inclui os retornos para serraria
Diaz Balteiro & Romero (2001)	Subsídio à atividade de seqüestro	6-200	Análise de sensibilidade para diferentes níveis de subsídio e níveis de captura
Kundhlande (2000)	Função de dano social	25	
Plantinga (1999)	Renda agrícola e subsídio em três estados	75-120	
Lewis et al. (1996)	Custo da renda florestal + custo do crescimento do estoque.		Não identifica os regimes ótimos
Fearnside (1995)	Preço como custo de oportunidade da floresta	4-7	
Hoen & Solberg (1994)	Custo é a diferença atualizada do decréscimo do valor em madeira	23-150*	Determina a fronteira entre o valor presente (VP) do mercado da madeira e o VP do seqüestro de CO ₂
Nordhaus (1990)	Modelo energético onde se simula o impacto das políticas de emissões	55-120	O valor é exógeno à atividade produtiva avaliada

Quadro 1 - Metodologias de valoração de carbono seqüestrado.

Autor	Tipo de Custo	Valor de carbono (US\$.MgC)	Característica
Nordhaus (1990)	Florestação em terras abertas	42-114	Única função de produção a nível mundial e nacional.
Moulton & Richards (1990)	Potencial de seqüestro em escala através de um programa simulado incluindo áreas de culturas de grãos e áreas de pastagem privadas.	5-43	Renda + custo de tratamento anualizado

Quadro 1 - Metodologias de valoração de carbono seqüestrado

* Valores aproximados com uma taxa de desconto de 4%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Formação do estoque de carbono

O carbono atmosférico é retido na floresta através do processo de fotossíntese pelo qual o CO_2 se armazena na biomassa florestal. Parte do carbono capturado é utilizada na respiração e o resto se transfere à biomassa arbórea, constituída pelas toras, galhos, raízes e folhas (Fig. 1).

Figura 1 - Ciclo do carbono desde a biomassa florestal até o lançamento à atmosfera.

No processo de crescimento florestal, uma parte da biomassa formada morre e forma a serapilheira que junto aos resíduos gerados nas sucessivas colheitas e às árvores caídas entram no processo de humificação, relançando-se na atmosfera, parte do carbono capturado no processo anterior. A diferença entre o carbono líquido incorporado pelo processo de fotossíntese e o carbono relançado à atmosfera é o carbono efetivamente seqüestrado na biomassa arbórea (Dury et al., 2002).

A biomassa colhida se divide em duas frações: uma liberada e outra retida nos derivados por períodos que variam dependendo do tipo de produto final obtido. A quantidade de carbono líquido retido na plantação florestal é a medida final que interessa nos projetos ambientais para contabilizar as quantidades abatidas da atmosfera. Uma das metodologias usadas para obter esse valor é a medição nas variações dos estoques de carbono na plantação florestal. O carbono retido num momento dado será a soma dos acúmulos líquidos dos períodos anteriores de forma tal que :

$$C_t = \sum_{i=1}^n \Delta C_i$$

Porém, as medições de fluxos sucessivos são custosas e requerem uma metodologia de inventário permanente na plantação (Loza Balbuena, 2002). Também podem ser determinadas as mudanças nos estoques de carbono através de inventários florestais pontualmente feitos no tempo. Esta é a forma mais econômica e simples de obter a eficiência da plantação florestal no abatimento, mediante a simples premissa de que maior acúmulo de biomassa viva em pé representa maior quantidade adicional de carbono armazenada.

Uma parte do carbono na floresta é produto de um estoque acumulado na biomassa florestal até o momento t_{-1} . Outra parte do carbono C_t é devida ao fluxo de carbono que resulta do processo de fotossíntese líquido e se transforma em biomassa arbórea.

$$C = C_{t-1} + C_t$$

Parte do carbono se retém por períodos mais ou menos longos, dependendo do tipo de produto e destino final do mesmo. Uma vez feita a colheita, parte do carbono é relançada à atmosfera e outra é retida por um certo tempo nos produtos derivados. Esse

carbono retido poder-se considerar dentro da quantidade de carbono estocada num momento determinado, pois se acrescenta ao estoque de carbono que não é relançado na atmosfera.

Figura 2 - Dinâmica do carbono após a colheita.

3.1.1 Estudo de caso

Foram utilizados dados de trabalho feito no Estado da Bahia, Brasil (Stape, 2002), que abordou o efeito de fatores ambientais sobre o crescimento do material clonal *Eucalyptus grandis* x *urophylla* em 14 sítios produtivos para rotações curtas, entre 6 e 8 anos de idade, ao longo de um gradiente climático e geográfico.

O estudo amostrou 9 árvores por sítio que representaram três árvores dentro das três classes de tamanho. As árvores selecionadas foram coletadas e o sistema radicular grosso de mais de 10 mm foi removido com o objetivo de relacionar a produção de raízes e de biomassa com a eficiência na utilização de recursos luz, água e nitrogênio. Essas medições de raiz foram incorporadas ao modelo de crescimento de biomassa e somadas às partes aéreas para a determinação de carbono total das árvores nos sítios produtivos.

No estudo de Stape determinou-se para cada árvore a matéria seca das seguintes partes: tora, raiz grossa, casca, galhos e folhas. Para o presente estudo, desconsidera-se o carbono retido nas folhas e serapilheira pelo fato de já se considerar que a quantidade de folha produzida é igual à quantidade de folha que se incorpora ao solo, entrando num equilíbrio que não adiciona nem quita carbono à plantação florestal.

Os 14 sítios originais foram reagrupados em 2 classes: 9 sítios de alta produtividade e altura média dos dominantes aos 5 anos variando entre 19 m e 30,1 m; e 5 sítios de média produtividade com altura média dos dominantes, também aos 5 anos, variando entre 17,4 m e 23,2 m.

3.1.1.1 Modelo biométrico

Os dados levantados por Stape (2002) geraram medições de carbono por compartimento da árvore em Mg C.ha^{-1} , as quais se utilizaram para ajustar as equações para estimação da biomassa em casca, lenho, galhos e raízes grossas.

As diferentes partes da árvore não crescem proporcionalmente. A quantidade relativa de biomassa aumenta no lenho e diminui nas raízes grossas com decorrer do

tempo. Como exemplo para os modelos empregados em sítios de alta produtividade, o lenho, que representa 52,8% da biomassa total com uma idade de três anos, passa a 69,8% com uma idade de 11 anos. Mais informações sobre a formação de biomassa para partes, nos dois sítios, encontram-se no Anexo A. Inversamente, as raízes, que representam 22% da biomassa, tornam-se 13,8% para as mesmas idades.

Para a estimação de tora e casca empregou-se o modelo Gompertz (1832) (Anexo A) com transformação logarítmica, procedimento de regressão não-lineal Marquardt do SAS (Statistical Analysis System). As seguintes equações foram ajustadas para sítios de alta produtividade.

$$W = e \left[2,07456 e^{-3,81874} e^{-0,0371028 t} \right] \quad (1)$$

para casca,

$$W = e \left[4,3043 e^{-1,7687} e^{-0,0406 t} \right] \quad (2)$$

para lenho.

Para sítios de média produtividade, determinaram-se:

$$W = e \left[1,42217 e^{-6,9016} e^{-0,05261 t} \right] \quad (3)$$

para casca,

$$W = e \left[3,48456 e^{-2,14896} e^{-0,05114 t} \right] \quad (4)$$

para lenho.

Onde:

W = biomassa e

t = tempo medido em meses.

Para os galhos (G), utilizou-se o procedimento PROCLIN do SAS para o modelo que relaciona a biomassa da árvore com a idade (Karmacharya & Singh, 1992). Os ajustes para sítios de alta e média produtividade obtidos, respectivamente, foram:

$$\ln G = 0,74678 + \ln t \cdot 0,20769 \quad (5)$$

nos sítios de alta produtividade,

$$\ln G = -0,96770 + \ln t \cdot 0,51249 \quad (6)$$

nos sítios de média produtividade.

Para estimar raízes grossas (R), ajustaram-se equações de regressão (PROCREG do SAS) empregadas na literatura em estimações de latifolhadas (Li et al., 2002), e obteve-se:

$$R = 1,13657 W^{0,56239} \quad (7)$$

em sítios de alta produtividade,

$$R = 0,38356 W^{0,87035} \quad (8)$$

em sítios de média produtividade.

As curvas de crescimento das partes da planta são apresentadas nas Figuras 12 e 13 (Anexo A).

3.1.1.2 Determinação da linha base

O Protocolo de Quioto define através do seu artigo 12 o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, pelo qual um país pertencente ao Anexo I poderá usar as reduções de emissões que resultaram das atividades dos projetos, como forma de contribuir com as metas de abatimento. Inicialmente, esse mecanismo foi pensado para ser utilizado em atividades onde as fontes de energia se suplantem por fontes mais limpas, nos processos industriais. Desde o começo, a inclusão de reflorestamento e florestamento foi pouco precisa e a definição das atividades gerou controvérsias. Na última reunião das partes (United Nations Framework Convention On Climate Change), continuaram as indefinições para as atividades de reflorestamento e florestamento elegíveis ao MDL (Rocha, 2003). Porém, na reunião do ano anterior (United Nations Framework Convention On Climate Change, 2001), em Marrackesh, estabeleceram-se regras que limitam o uso de créditos oriundos de florestas e criou-se a unidade de remoção para esse tipo de atividades.

No presente estudo, assume-se que uma mudança na idade de corte da floresta permite a emissão de créditos pelo carbono adicional abatido. Este mecanismo não está aprovado para ser usado no MDL, mas permite determinar a oferta de carbono e simular, para uma floresta dada, o preço a ser pago pela inclusão do objetivo ambiental na empresa.

O Protocolo estabelece que as atividades a serem consideradas devem se iniciado a partir do ano 1990. Além dessa condição, as atividades têm que ser incrementais nas quantidades de carbono abatido em relação à situação anterior, que se considera a linha-base. Aquelas atividades florestais que seqüestrem carbono independentemente da existência do projeto ambiental não gerarão direitos de emissão. Esse conceito é o que diferencia uma floresta que se implanta com a finalidade original de produção de madeira e abate carbono, mas que não gera créditos de emissão, de outra projetada com tal propósito. Essa situação original foi modelada sem considerar a atividade ambiental, calculando-se os valores de carbono armazenado nas partes da árvore e carbono total, apresentadas nas Tabelas 1 e 2, para os sítios de alta e média produtividade.

Tabela 1. Carbono em compartimento de biomassa. Sítios de alta produtividade.

IDADE (anos)	CASCA (Mg C ha ⁻¹)	GALHOS (Mg C ha ⁻¹)	LENHO (Mg C ha ⁻¹)	RAIZES GROSSAS (Mg C ha ⁻¹)	Carbono Total (Mg C ha ⁻¹)
0,5	1,10	3,06	2,93	3,83	10,92
1	1,20	3,54	4,28	4,30	13,30
1,5	1,34	3,85	6,28	4,84	16,31
2	1,54	4,08	9,11	5,50	20,23
2,5	1,81	4,28	12,84	6,26	25,18
3	2,14	4,44	17,43	7,09	31,10
3,5	2,53	4,59	22,71	7,96	37,79
4	2,97	4,72	28,43	8,82	44,94
4,5	3,45	4,83	34,28	9,63	52,20
5	3,95	4,94	39,99	10,39	59,26
5,5	4,44	5,04	45,33	11,06	65,87
6	4,92	5,13	50,15	11,64	71,84
6,5	5,36	5,22	54,39	12,14	77,11
7	5,76	5,30	58,03	12,56	81,65
7,5	6,12	5,37	61,09	12,91	85,50
8	6,43	5,45	63,64	13,20	88,72
8,5	6,70	5,51	65,72	13,44	91,38
9	6,93	5,58	67,42	13,63	93,56
9,5	7,12	5,64	68,78	13,79	95,33
10	7,27	5,70	69,87	13,92	96,78
10,5	7,40	5,76	70,75	14,03	97,94
11	7,51	5,82	71,44	14,12	98,88

Tabela 2. Carbono em compartimento de biomassa. Sítios de média produtividade.

IDADE	CASCA	GALHOS	LENHO	RAIZES GROSSAS	Carbono Total
(anos)	(Mg C ha ⁻¹)	(Mg C ha ⁻¹)	(Mg C ha ⁻¹)	(Mg C ha ⁻¹)	(Mg C ha ⁻¹)
0,5	1,01	1,69	2,05	1,49	6,24
1	1,04	1,81	2,97	1,89	7,70
1,5	1,10	1,93	4,40	2,45	9,88
2	1,22	2,07	6,40	3,15	12,85
2,5	1,41	2,22	8,96	3,97	16,55
3	1,65	2,38	11,92	4,82	20,77
3,5	1,95	2,54	15,05	5,66	25,21
4	2,27	2,72	18,13	6,43	29,55
4,5	2,59	2,89	20,95	7,11	33,54
5	2,89	3,07	23,41	7,67	37,03
5,5	3,15	3,24	25,47	8,12	39,98
6	3,38	3,40	27,14	8,47	42,40
6,5	3,56	3,56	28,46	8,75	44,33
7	3,70	3,71	29,49	8,96	45,86
7,5	3,81	3,84	30,28	9,12	47,04
8	3,90	3,96	30,87	9,23	47,96
8,5	3,96	4,07	31,32	9,32	48,67
9	4,01	4,17	31,65	9,39	49,22
9,5	4,05	4,25	31,90	9,43	49,64
10	4,07	4,33	32,09	9,47	49,96
10,5	4,09	4,39	32,22	9,50	50,20
11	4,11	4,45	32,32	9,51	50,40

A linha-base dos sítios florestais é a quantia de carbono abatido em condições comerciais da plantação, toneladas de carbono retidas na idade de máximo retorno econômico da espécie florestal. Calcularam-se as quantidades de carbono nas árvores e estabeleceu-se a quantidade retida na idade de máximo Valor Esperado da Terra o VET (Faustmann, 1849; Samuelson, 1976) como a linha-base. Porém, não existe um único VET, o qual é função da:

r = Taxa de desconto (%), do pfc = Preço da fibra celulose, da S = Qualidade de Sítio e do p_i = Preços dos insumos.

$$VET = (r, p_{fc}, S, p_i)$$

Foi simulada uma situação de mercado em que o preço do metro cúbico estérreo em pé vale US\$ 7,5, a taxa de câmbio é R\$ 3,59 US\$, a taxa de desconto é 11% anual e

os custos de produção que são detalhados pontualmente no item 3.1.1.4. A partir de então, determinam-se as curvas de abatimento marginal de carbono, representadas na Figura 3 como a diferença de carbono retida na idade de máximo VET (ver Tabela 3) e a idade considerada.

Figura 3 - Carbono sequestrado acima da linha base.

A curva acima da abscissa representa as quantidades líquidas de carbono retidas por uma modificação no manejo dos talhões.

Tabela 3. Valor econômico da terra.

Idade (anos)	Sítios de Média Produtividade (US\$ ha ⁻¹)	Sítios de Alta Produtividade (US\$ ha ⁻¹)
0,5	-6762,4	-6153,2
1	-3418,0	-2974,2
1,5	-2207,9	-1789,9
2	-1481,9	-1047,0
2,5	-991,1	-512,4
3	-635,7	-92,1
3,5	-378,7	244,5
4	-185,9	522,7
4,5	-60,4	729,3
5	12,9	871,2
5,5	47,3	956,5
6	54,6	994,9
6,5	43,9	996,3
7	21,9	969,8
7,5	-6,4	923,6
8	-37,8	864,2
8,5	-70,1	796,9
9	-101,9	725,6
9,5	-132,5	653,1
10	-161,4	581,3
10,5	-188,5	511,7
11	-213,6	445,1

3.1.1.3 Solo

Para o presente trabalho, considerou-se que não existem variações marginais no estoque de carbono no solo, devido às mudanças nos regimes de manejo dos talhões de *Eucalyptus*.

Paul et al. (2002) fazem uma revisão de 43 estudos que mediram as mudanças dos níveis de carbono em solos com florestas. Embora não seja possível obter resultados

definitivos da dinâmica do C, nos solos florestais em regimes de rotações longas existem algumas evidências de um decréscimo inicial de C no solo seguido de uma gradual recuperação, atingindo valores maiores quando comparados a solos que foram previamente agrícolas. No mesmo estudo conclui-se que, para regimes com rotações curtas a médias, o uso prévio do solo, fatores climáticos e tipo de floresta implantada afetam o balanço de carbono, mas os ganhos ou perdas de carbono são pequenos em comparação ao acúmulo de biomassa. Stape (2002) mede o carbono do solo em 16 parcelas num intervalo de 2 anos, determinando que o carbono orgânico não representa variações significativas. Embora o carbono mineral apresente um declínio líquido significativo de $-0,09\text{kg m}^{-2}$, esse elemento constitui 2,3% do estoque de carbono inicial de $4,2\text{kg m}^{-2}$.

Para o presente trabalho e com base nas pesquisas citadas (Paul et al., 2002 e Stape, 2002), considera-se que a mudança dos regimes de manejo florestal não altera a condição original do solo com respeito à quantidade líquida de carbono. Como essas condições mantêm-se constantes no estudo, considera-se nulo o seu efeito marginal no balanço final de carbono e não são incluídas na contabilidade.

3.1.1.4 Custos de produção

Os custos de produção empregados referem-se aos efetivos do trabalho de Stape (2002), modificados com a inclusão de custos baseados em Rodriguez². Os cálculos são resumidos na Tabela 4.

² Custos de Produção Florestal. Planilha preparada pelo Prof. Luiz Carlos Estraviz Rodriguez (2002).

Tabela 4. Custos de produção correntes de eucalipto.

Atividade	Tempo (ano)	Custo (US\$ ha ⁻¹)
1º Combate às Formigas	0	9,4
1º Replanteio + Transp Mudas	0	15,6
2º Combate às Formigas	0	5,8
Adubação de Cobertura Mecanizada	0	32,9
Aplicação de Herbicida Manual na Linha de Plantio	0	14,3
Aplicação de Herbicida Mecanizada Área Total	0	22,0
Aplicação de Herbicida Mecanizada na Entre Linha	0	11,4
Fosfatagem	0	45,8
Plantio + Transp Mudas	0	106,2
Roçada Manual Pós Plantio	0	7,1
Roçada Manual Pré Plantio	0	17,8
Roçada Manual Total	0	18,8
Ronda	0	2,8
Subsolagem	0	33,4
Custos de Administração ano 0	0	78,9
Custos de Administração ano 1	1	10,5
Custos de Administração ano 2	2 em Diante	9,8
Aplicação mecanizada de herbicida em área total	1,2,3	15,4
Controle de formigas	1 em Diante	6,1
Adubação complementar de manutenção	1	11,7
Conservação de aceiros	1 em Diante	3,7
Controle de formigas pré-corte	Ano da colheita	14,9
Roçada mecânica pré-corte	Ano da colheita	1,5
Roçada manual pré-corte	Ano da colheita	12,0
Custos Pre-Colheita	Ano da colheita	28,4

Fonte: Elaboração própria com base em dados de Stape (2002) e de Rodriguez (2002).

*Expressos em dólares, nov. 2002.

3.1.1.5 Receitas

Calculou-se o volume de madeira por hectare convertendo as toneladas de carbono do lenho em metros cúbicos por hectare, o qual é dado por:

$$\frac{Celulose}{ha} = \frac{Carbono (Ton)}{ha} \times \frac{Massa total(Ton)}{Carbono (Ton)} \times \frac{Volume (m^3)}{Massa Total(Ton)} \quad (9)$$

As toneladas de carbono por hectare se transformam em volume de madeira por hectare multiplicando a quantidade de carbono por hectare pelo inverso da concentração de carbono na massa total e da densidade básica. Considerou-se uma concentração de carbono na massa total de 45% (Stape, 2002), e 50% foi a densidade básica usada (Vital, 1985; Souza, 1986; Carvalho, 1996).

3.1.1.6 Unidade de medida

Para o presente trabalho, consideraram-se as medidas de tonelada de carbono e também a conversão adotada pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) para os GEE. Esses se comparam na base de potencial de aquecimento dos gases, o que se usa como medida de conversão de GEE em CO₂ ou em Tonelada de Bióxido de Carbono Equivalente. A título de exemplo, a emissão de uma tonelada do gás metano equivale à emissão de 21 toneladas de gás CO₂ no período de 100 anos.

A transformação da Tonelada de Carbono em Tonelada de Bióxido de Carbono Equivalente (Mg CO₂-e) é a medida de comercialização internacional, obtida a partir da relação dos pesos moleculares:

$$\frac{Peso CO_2}{Peso C} = 3,67 \quad (10)$$

Portanto, uma tonelada de carbono seqüestrada equivale a 3,67 Mg CO₂-e.

3.1.1.7 Mercado da celulose

Neste trabalho, a valoração da tonelada de carbono em florestas de eucalipto está ligada diretamente ao mercado da celulose de fibra curta. A indústria de fabricação de celulose é de capital intensivo, estando muito desenvolvida no Brasil que é o principal produtor e exportador da *commodity*. O preço da celulose tem um comportamento cíclico que está ligado principalmente ao aumento da escala de produção das unidades fabris (Antunes, 1998).

Considera-se que variações dos estoques NORSCAN, que medem a produção dos EUA, Canadá e países escandinavos, em torno da média de 1.500 mil toneladas, façam variar inversamente o preço da celulose. Embora informes conjunturais do mercado indiquem uma tendência de alta no preço da tonelada de celulose (Vilardaga, 2002), no presente trabalho considera-se que a capacidade instalada do mercado de celulose de eucalipto em nível mundial e regional acompanhará o consumo aparente e que o preço se manterá ao redor da média de US\$ 480/tonelada (PaperAge, 2003).

Até o ano 2005, prevê-se uma expansão de 1.300 mil toneladas de celulose na capacidade instalada de produção no Brasil, que se soma às 3.700 mil toneladas de capacidade atual (Banco de Desenvolvimento Econômico e Social, 2001a). Uma característica dos ciclos é que a diferença entre o máximo e mínimo é cada vez menor e que a recuperação dos baixos patamares é cada vez mais lenta (Antunes, 1998). O preço de celulose de mercado é formado a partir dos preços de celulose de fibra longa, com deságio de 10% (Banco de Desenvolvimento Econômico e Social, 2001b).

O presente estudo considera que o dono da floresta é não-integrado e vende a madeira em pé. Não existe um mercado formal de madeira em pé para celulose na região do estudo (Bahia) e as compras por parte das unidades fabris são ocasionais. Considerou-se preços da madeira pagos ao produtor entre US\$ 5,5 e 9,5 m³ estéreo³.

³ AMBROGI, M. (ARACRUZ, Eunápolis). Comunicação pessoal, 2002.

3.1.1.8 Taxa de desconto

Foi utilizada a taxa de desconto média de 11% ao ano que representa a taxa de juros média, do longo prazo, da economia brasileira assim como o custo de oportunidade da economia de mediano a longo prazo.

A taxa de desconto se compõe do retorno requerido e o prêmio de risco; a primeira de 5,75% se estimou como referência à taxa Libor semestral, média dos últimos 12 anos (Commercial Property Finance Brokers, 2002), e o prêmio de risco utilizado foi de 5% (Instituto Pesquisas Econômicas, 2003).

A taxa de 11% também é a usada por instituições internacionais para projetos de investimento similares como o Banco Mundial.

Figura 4 - Evolução taxa Libor semestral.

O período 2002-2003 foi de forte oscilação na cotação do dólar devido a fatores tanto internos como externos da economia brasileira. Isso aumenta a incerteza dos preços relativos usados no estudo de caso. Tomando a taxa de câmbio (R\$ US\$⁻¹)

comercial compra média mensal (IPEA, 2003), a média para o período janeiro 2002 até maio de 2003 foi de 3,03 (R\$ US\$⁻¹).

3.2 Determinação do valor p^*

Este trabalho quantifica o valor do serviço ambiental de seqüestro de carbono como o custo de oportunidade privado de manter a biomassa em pé. Parte-se da premissa de que os regimes de manejo florestal que objetivam fixar carbono alteram a natureza do produto florestal. O manejo da produção de biomassa florestal passa a ter duas finalidades simultâneas e conflitantes: fibra para produção de celulose e biomassa em pé fixadora de carbono. Dessa maneira, a rotação que maximiza a produção de fibra será diferente da rotação que maximiza a fixação de carbono.

Dada uma função de produção mista de fibra e seqüestro de CO₂

$$Q_{f,CO_2} = c(t, B) \quad (11)$$

com t variando no intervalo 0 a T' , e

uma função de produção de fibra

$$Q_f = f(t, B) \quad (12)$$

com t variando no intervalo 0 a T'' ,

B representa fatores bióticos como qualidade do sítio considerado, material genético etc.

A quantidade de carbono relançada à atmosfera é função do ano de produção da rotação. Tem influência também o tipo de uso após a colheita. O proprietário da floresta tem um custo para manter o estoque de madeira em pé que é o custo de oportunidade representado pelo crescimento em volume de madeira e da ocupação do solo.

A receita capitalizada ao final do período, para os regimes que sejam de destino misto, será a soma das receitas obtidas com a fibra para celulose mais o valor da tonelada de seqüestro p_{CO_2} vezes a quantidade de carbono fixada:

$$R_{f,CO_2} = \sum_{t=0}^{T'} p_{CO_2} \cdot \Delta C_{CO_2t} \cdot (1+r)^{T'-t} + \sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T'-t} \quad (13)$$

A receita obtida com a produção de fibra é:

$$R_f = \sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T''-t} \quad (14)$$

Onde:

R_{f,CO_2} = receita capitalizada no final da rotação originada pela venda de fibra de celulose e pelo seqüestro de carbono (US\$);

V_t = volume colhido nos sucessivos períodos t ($m^3 \text{ ha}^{-1}$);

r = taxa de desconto (%);

R_f = receita capitalizada no final da rotação exclusivamente originada pela venda de fibra celulose (US\$);

P_{CO_2} = valor da tonelada de carbono seqüestrado (US\$ $Mg^{-1}C$);

ΔC_{CO_2t} = quantidade líquida fixada de carbono no período t ;

P_{fc} = preço da fibra para celulose (US\$ Mg^{-1}).

ΔC_{CO_2t} representa o acúmulo de biomassa nos sucessivos períodos t acima da linha-base explicada no item 3.1.1.2.

Para valorar o Ativo Florestal, aplica-se o conceito de Faustmann (1849), no qual o Valor Esperado do Ativo Terra Florestal (VET) é a atualização das infinitas rendas líquidas futuras geradas pelos produtos e serviços do Ativo (Samuelson, 1976).

Para o caso da floresta com destino misto fibra e seqüestro de carbono:

$$VET_{fc,CO_2} = \frac{R_{fc,CO_2} - K_{fc,CO_2}}{[(1+r)^T - 1]} \quad (15)$$

onde K_{fc,CO_2} e K_{fc} são os custos de manutenção, manejo e colheita da floresta com destino misto e produção de fibra para celulose, respectivamente, levados ao final do período.

$$K_{fc,CO_2} = \sum_{t=0}^T k_{fc,CO_2} \cdot (1+r)^{T-t} \quad (16)$$

Para uma floresta voltada à produção de fibra, o Valor Esperado será:

$$VET_f = \frac{R_f - K_f}{[(1+r)^{T''} - 1]} \quad (17)$$

$$K_{fc} = \sum_{t=0}^{T''} kf \cdot (1+r)^{T''-t} \quad (18)$$

Assume-se que não se conhece o valor p_{CO_2} , mas existe um valor p^* de indiferença que faz com que o VET com destino misto (seqüestro de carbono e fibra) se iguale ao VET do sistema de produção exclusivo de fibra.

$$VET_{f,CO_2} = VET_f$$

Desenvolvendo ambas as equações, tem-se que:

$$\frac{\sum_{t=0}^{T''} p^* \Delta C_{CO_2t} \cdot (1+r)^{T''-t} + \sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{fc,CO_2}}{[(1+r)^{T''} - 1]} = \frac{\sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{fc}}{[(1+r)^{T''} - 1]} \quad (19)$$

Isolando o valor p^* :

$$p^* = \frac{\sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{fc}}{[(1+r)^{T''} - 1]} \cdot \frac{[(1+r)^{T''} - 1]}{\sum_{t=0}^{T''} \Delta C_{CO_2t} \cdot (1+r)^{T''-t}} - \frac{\sum_{t=0}^{T''} P_{fc} \cdot V_t - K_{CO_2}}{\sum_{t=0}^{T''} \Delta C_{CO_2t} \cdot (1+r)^{T''-t}} \quad (20)$$

Se considerado o preço da fibra constante ao longo do período e arranjando a equação anterior, obtém-se:

$$p^* = \frac{\left[P_{fc} \sum_{t=0}^{T''} V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{fc} \right] \cdot [(1+r)^{T''} - 1] - \left[P_{fc} \sum_{t=0}^{T''} V_t \cdot (1+r)^{T''-t} - K_{CO_2} \right] \cdot [(1+r)^{T''} - 1]}{[(1+r)^{T''} - 1] \cdot \sum_{t=0}^{T''} \Delta C_{CO_2t} \cdot (1+r)^{T''-t}} \quad (21)$$

Assume-se que o produtor, ao decidir qual sistema de produção irá implantar, opta pelo regime que mais remunera o seu ativo terra. A equação (9) oferece uma

estimativa do valor p^* que deveria ser pago pelo seqüestro de carbono e que torna o produtor indiferente entre um sistema que produz fibra e seqüestra mais carbono e um sistema que exclusivamente produz fibra. Valores maiores que p^* induziriam o produtor a optar por regimes que seqüestrem carbono.

Esse montante representa o custo de oportunidade do dono da floresta por unidade de tonelada de C seqüestrada. A quantidade de CO₂ adicional é compensada pela diferença entre o retorno maximizador com destino exclusivo de fibra e o retorno com a inclusão de atividade de seqüestro.

O p^* é o valor que torna indiferente produzir fibra para celulose ou produzir fibra com destino misto para celulose e armazenar carbono em pé. Este valor p^* posiciona todos os agentes econômicos na mesma situação original, pois é o valor que o agente produtor teria recebido por ter continuado com sua atividade original. Um valor acima de p^* é o preço que incentiva os agentes a realizar atividades ambientais.

O valor ΔCO_2 é o incremento de CO₂ efetivamente retido pela floresta. Dessa maneira, o preço do carbono a ser pago ao dono da floresta se relaciona com o mercado de produtos derivados da madeira.

O preço de seqüestro de carbono P_{CO_2} a ser pago para o dono dessa floresta será tal que:

$$p_{\text{CO}_2} \geq p^*$$

A um preço abaixo de p^* não existem incentivos econômicos para reter carbono e os agentes continuariam com a atividade anterior.

Então p^* é função de:

$$p^* = f(p_{fc}, V_t, r, \sum \Delta \text{CO}_2) \quad (22)$$

Onde:

P_{fc} = preço da fibra para celulose (US\$ Mg⁻¹);

V_t = produtividade das florestas para produção de celulose;

r = taxa de desconto (%);

$\sum \Delta \text{CO}_{2t}$ = capacidade das florestas em captar carbono.

O p_{CO_2} multiplicado pela quantidade de CO_2 líquida anualmente representaria a Renda Potencial do Ativo Ambiental Florestal. É esperado que a idade de rotação de produção de fibra seja mais curta que a rotação para seqüestro: $t_f \neq t_{f,CO_2}$.

Partindo da equação 8, pode-se chegar à afirmação anterior; rearranjando, tem-se que:

$$p^* \frac{\sum_{t=0}^{T^*} \Delta CO_2 \cdot (1+r)^{T^*-t}}{[(1+r)^{T^*} - 1]} = \frac{\sum_{t=0}^{T^{**}} P_{fc} \cdot V_t \cdot (1+r)^{T^{**}-t} - K_{fc}}{[(1+r)^{T^{**}} - 1]} - \frac{\sum_{t=0}^{T^*} P_{fc} \cdot V_t - K_{CO_2}}{[(1+r)^{T^*} - 1]} \quad (23)$$

O termo da esquerda é o valor da renda ambiental e o termo da direita é o custo privado de mudança no manejo florestal calculado como a diferença entre o VET para fibra e a nova renda florestal pela produção de fibra com a nova rotação.

Finalmente, o preço que equilibra o mercado ambiental com o mercado privado é p^* .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Valor da tonelada de carbono

O valor da tonelada de carbono é calculado para cada idade e sítio florestal. As Tabelas 5 e 6 mostram os valores calculados da tonelada de seqüestro de CO₂-e, para um preço da madeira para celulose de US\$ 7,5 estéreo e uma taxa de desconto de 11% anual.

Esses valores representam p^* , a quantidade monetária que precisaria ser paga para que o produtor florestal possa optar pelos regimes de manejo que incluam o objetivo de seqüestro de carbono, e incluir a atividade ambiental na função produtiva da empresa. Nas tabelas seguintes são apresentadas também as quantidades líquidas de carbono abatidas e retidas na biomassa, a partir de uma modificação na idade de corte.

Um valor nulo da tonelada é consequência de não se abater carbono adicional, e corresponde à idade de máximo VET atingido nas condições de mercado referenciadas: idades que correspondem a 6 anos nos sítios de média produtividade e 6,5 anos nos sítios de alta produtividade. O produtor não recebe compensação monetária por continuar fazendo a mesma atividade e não reter carbono adicional na biomassa. À medida que a biomassa cresce afasta-se da idade de máximo VET com o que o valor de compensação seria maior.

Tabela 5. Valor da tonelada de Carbono líquido retido. Sítios de média produtividade.

Idade (anos)	Produtividade Média	
	p* (US\$ Mg ⁻¹ CO ₂ -e)	Carbono Marginal Retido (Mg CO ₂ -e ha ⁻¹)
1,00	-2,8	-129,9
1,5	-3,0	-121,5
2	-3,0	-110,4
2,5	-3,0	-96,8
3	-2,9	-81,2
3,5	-2,8	-64,7
4	-2,4	-48,5
4,5	-1,9	-33,6
5	-1,3	-20,4
5,5	-0,5	-9,2
6	0,0	0,0
6,5	1,4	7,5
7	2,5	13,4
7,5	3,8	18,1
8	5,3	21,9
8,5	6,8	24,9
9	8,5	27,3
9,5	10,3	29,3
10	12,2	30,9
10,5	14,3	32,3
11	16,4	33,5

Valores negativos da tonelada de seqüestro expressam o quanto deveria ser pago pelo produtor para compensar a emissão de uma tonelada de carbono. No entanto, os valores positivos seriam a compensação monetária mínima a receber para implementar uma mudança no manejo.

Tabela 6. Valor da tonelada de Carbono líquido retido. Sítios de alta produtividade.

Idade (anos)	Produtividade Alta	
	p*	Carbono Marginal Retido
	(US\$ Mg ⁻¹ CO ₂ -e)	(Mg CO ₂ -e ha ⁻¹)
1,00	-1,8	-234,2
1,5	-2,0	-223,1
2	-2,1	-208,7
2,5	-2,2	-190,6
3	-2,2	-168,9
3,5	-2,2	-144,3
4	-2,0	-118,1
4,5	-1,6	-91,4
5	-1,2	-65,5
5,5	-0,7	-41,3
6	-0,1	-19,3
6,5	0,0	0,0
7	1,7	16,7
7,5	2,7	30,8
8	3,9	42,6
8,5	5,2	52,4
9	6,7	60,4
9,5	8,3	66,9
10	10,1	72,2
10,5	12,0	76,5
11	14,1	79,9

A Figura 5 apresenta duas curvas de oferta de carbono líquido retido, uma para cada sítio de produtividade, em função do valor p* calculado para compensar o produtor florestal pelo seqüestro.

Quantidades positivas de carbono seqüestrado na biomassa florestal geram valores crescentes da tonelada fixada e aumentam a oferta de carbono. No começo os dois sítios geram curvas semelhantes de seqüestro de carbono, mas, com o decorrer do

tempo, diferenciam-se. O sítio de alta produtividade fixa mais carbono com o mesmo preço pago pela tonelada que o sítio de média produtividade, sendo que o sítio mais produtivo em produção de madeira para celulose é também mais eficiente para abater carbono.

Figura 5 - Oferta de bióxido de Carbono equivalente.

A Figura 6 apresenta as mesmas curvas de oferta apresentadas na Figura 5, mas inclui o intervalo de valores para os quais o sequestro é inferior à linha base.

Figura 6 - Oferta de bióxido de Carbono equivalente, incluindo seqüestro inferior à linha base.

4.2 Análise de sensibilidade

Os resultados apresentados na seção anterior consideraram valores fixos para a taxa de desconto e para preço da celulose. Variações nesses parâmetros permitem uma análise de sensibilidade da variação do valor p^* . Para efeito dessa análise, consideraram-se taxas de desconto variando entre 9% e 13% anual e preços da celulose entre US\$ 5,5 e 9,5 m^{-3} em diferentes idades de corte.

Os cálculos foram feitos para a idade de 11 anos, como mostram as Tabelas 7 e 8, e para as idades de 7, 8, 9 e 10 anos, apresentadas no Anexo B. Um aumento no preço da madeira para produzir celulose tem o efeito, em geral, de aumentar o valor de seqüestro. O aumento do preço da madeira produz o efeito de encurtar os turnos ótimos

de corte, o que provoca um maior custo para o agente privado manter a biomassa em pé, alongando a rotação. Porém, este comportamento não é regular, como observado nas Figuras 16 e 19 (Anexo C). Um aumento da taxa de desconto também aumenta o preço do carbono retido. Nas Figuras 7 e 8, acompanha-se o comportamento do valor frente às variáveis.

Tabela 7. Valor da tonelada de Carbono (US\$.Mg-1 CO₂-e). Sítios de média produtividade. Idade: 11 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	7,74	12,81	14,31	18,73	18,33
10	8,36	10,65	15,32	19,99	19,64
11	9,01	11,46	16,38	16,74	20,99
12	9,69	12,29	17,47	17,91	22,40
13	10,38	13,15	18,60	19,13	23,86

Tabela 8. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg-1 CO₂-e). Sítios de alta produtividade. Idade: 11 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	7,17	9,67	12,17	14,67	13,86
10	7,80	10,47	13,13	12,73	15,01
11	8,46	11,29	14,12	13,77	16,21
12	9,13	12,13	12,25	14,84	17,44
13	9,82	13,00	13,19	15,95	18,72

O efeito das variações do preço relativo da madeira para celulose no valor da tonelada de carbono é apresentado na Figura 7. Um aumento do preço da madeira para celulose de US\$ 5,5 m⁻³ a US\$ 9,5 m⁻³ produz um deslocamento para a direita na curva de oferta de carbono. Tem-se uma redução da idade de máximo VET de 6,5 anos para 5,5 anos, o que resulta numa oferta maior de carbono.

No caso dos sítios de alta produtividade, o aumento do preço da madeira à inversa provoca um deslocamento para a esquerda da oferta de carbono, reduzindo a quantidade ofertada.

Figura 7 - Comportamento da oferta de carbono em diferentes sítios ante variações do preço da celulose.

Nas Tabelas 9 e 10 figuram as quantidades de carbono sequestrado para sítios de média e alta produtividade frente uma alteração nas variáveis taxa de desconto e preço da celulose.

Tabela 9. Seqüestro marginal de Carbono (Mg CO₂-e há⁻¹). Sítios de média produtividade. Idade: 11 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	26,05	26,05	33,51	33,51	42,73
10	26,05	33,51	33,51	33,51	42,73
11	26,05	33,51	33,51	42,73	42,73
12	26,05	33,51	33,51	42,73	42,73
13	26,05	33,51	33,51	42,73	42,73

Tabela 10. Seqüestro marginal de Carbono (Mg CO₂-e há⁻¹). Sítios de alta produtividade. Idade: 11 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	79,91	79,91	79,91	79,91	99,24
10	79,91	79,91	79,91	99,24	99,24
11	79,91	79,91	79,91	99,24	99,24
12	79,91	79,91	99,24	99,24	99,24
13	79,91	79,91	99,24	99,24	99,24

O grau de variação de oferta de carbono ante uma mudança no preço do carbono é medido pela elasticidade-preço da oferta que, conforme mostram as Tabela 11 e 12, é menor que 1 a partir das idades de máximo VET para cada sítio ($\varepsilon < 1$): um aumento de 1% no preço pago pela tonelada de carbono abatido tem um aumento menos que proporcional na oferta de carbono retido nas florestas. A oferta inelástica está determinada pela limitante biológica da floresta de acumular biomassa.

Tabela 11. Elasticidade-preço da oferta. Sítio de média produtividade.

Idade (anos)	Elasticidade
6	1,00
6,5	1,00
7	0,42
7,5	0,48
8	0,45
8,5	0,41
9	0,36
9,5	0,32
10	0,29
10,5	0,26
11	0,24

Sítios de menor produtividade reagem em menor proporção ao aumento de valor da tonelada de carbono.

Tabela 12. Elasticidade-preço da oferta. Sítio de alta produtividade.

Idade (anos)	Elasticidade
6,5	1,00
7	1,00
7,5	1,04
8	0,79
8,5	0,65
9	0,53
9,5	0,45
10	0,38
10,5	0,32
11	0,27

Figura 8 - Análise de sensibilidade do preço de Carbono à taxa de juros e ao preço da celulose.

O efeito combinado de aumento do preço da madeira e da taxa de desconto eleva para os dois sítios o valor a ser pago pela tonelada de carbono na biomassa. As Figuras 9 e 10 mostram a oferta de celulose para os sítios frente a aumento da taxa de desconto.

Figura 9 - Oferta de carbono e taxa de juros. Sítios de média produtividade.

Figura 10 - Oferta de carbono e taxas de juros. Sítios de alta produtividade.

A Figura 11 representa os custos marginais para os dois sítios. A teoria econômica diz que o ponto eficiente de abatimento é aquele em que os custos marginais se igualam:

$$\frac{\partial CT_{SA}}{\partial C} = \frac{\partial CT_{SB}}{\partial C}$$

Se considerados os dois sítios, no estudo de caso, esse ponto seria atingido a um preço pago pela tonelada de carbono de US\$ 6,68 Mg⁻¹ CO₂-e, entre os 8,5 e 9 anos nos sítios de alta produtividade e US\$ 5,27 Mg⁻¹ CO₂-e entre os 8 e 8,5 anos nos sítios médios.

Figura 11 - Custo marginal de abatimento em sítios de alta e média produtividade.

A título de exemplo, na Tabela 13, calcula-se a Renda Ambiental Equivalente que proporcionaria aos agentes recompensas pela atividade ambiental.

Tabela 13. Cálculo da renda potencial ambiental.

Sítios	p^* ($\text{US\$ Mg}^{-1} \text{CO}_2\text{-e}$)	Carbono Marginal Retido ($\text{Mg CO}_2\text{-e ha}^{-1}$)	Idade (anos)	Renda Potencial Ambiental Equivalente ($\text{US\$ ha}^{-1}$)
Medios	5,27	21,9	8	115,5
Altos	6,7	60,4	9	403,0

4.3 Discussão dos resultados

Os valores calculados no trabalho foram estimados em $\text{US\$ } 8,16 \text{ Mg}^{-1} \text{CO}_2\text{-e}$ e $\text{US\$ } 7,19 \text{ Mg}^{-1} \text{CO}_2\text{-e}$, para sítios de média e alta produtividade, respectivamente. Esses valores, que correspondem a $\text{US\$ } 29,95 \text{ Mg}^{-1}\text{C}$ e $\text{US\$ } 23,75 \text{ Mg}^{-1}\text{C}$, estão acima das

estimativas médias. Fearnside (1995) obteve US\$ 3,71 Mg^{-1}C (em dólar 1992) em eucaliptos para polpa, estimados para os estados de Minas Gerais e São Paulo, em rotações de 6 anos e vida do projeto de 100 anos, com uma taxa média de abatimento de 45 Mg C ha^{-1} . Esse número foi obtido a partir da divisão do valor atualizado líquido dos fluxos do projeto pelas toneladas abatidas.

Propostas de projetos de MDL no Brasil indicam US\$ 0,47 a 3,91 Mg^{-1}C em Palmeiras, no Pará, US\$ 5 Mg^{-1}C de Palmeiras, no Carajás, e de US\$ 12,46 a 19,94 Mg^{-1}C em plantações de Teca, no Mato Grosso. Esses valores foram alcançados ao se dividirem os custos, descontados de instalação e manutenção do projeto, pelas toneladas abatidas. No Uruguai, calcula-se o custo de abatimento em US\$ 39,15 Mg^{-1}C em projetos florestais e US\$ 22,57 Mg^{-1}C em projetos florestais combinados com gado (MVOTMA, 2002). De Jong (2000) obteve na média US\$ 15 Mg^{-1}C em florestas nativas no sul do México.

Variações do preço da tonelada de carbono frente às mudanças nos preços relativos resultam em valores que se comportam de maneira não regular, como se observa nas Figuras 16 e 17. Isso está alinhado com o observado por De Jong (2000), que simula variações de seqüestro de carbono frente às mudanças nas taxas de juros. Os fatores de desconto afetam de diferente maneira os custos e benefícios do carbono retido na biomassa, mas não se pode ter um padrão de comportamento para mudanças nos preços relativos dos projetos.

De maneira geral, para a metodologia proposta, pode-se pensar que mudanças nos preços relativos que reduzam os turnos de cortes ótimos com destino à madeira comercial vão ter um efeito de aumentar a distância entre o ótimo e a idade de maior produção de biomassa e portanto, aumenta-se o preço pago pela biomassa

A quantidade de carbono frente ao aumento no preço do carbono é proporcionalmente decrescente, fato determinado pela função de produção biológica da floresta onde, a partir de um certo ponto, os rendimentos de produção de biomassa são decrescentes.

A produtividade do sítio é uma variável pouco estudada no valor de carbono. Nos resultados obtidos, a oferta de carbono em sítio de produtividade alta é maior e mais

elástica. Esses sítios seriam mais eficientes em capturar carbono ao mesmo preço e frente a um eventual aumento dos valores da tonelada abatida. Porém, a capacidade biológica das florestas é limitada e a resposta em produção de biomassa apresenta uma elasticidade decrescente.

Poucos estudos incorporam o ótimo privado florestal como custo de oportunidade da empresa florestal (Gong, 1998; Díaz Balteiro, 2001; Hoen, 1994). Os estudos feitos nessa área determinam a oferta de carbono pelos níveis de subsídio que a sociedade manifesta aos donos das terras florestais. Da perspectiva do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, o subsídio é o equivalente a quanto estariam dispostos os agentes emissores de GEE a ofertar para seguir poluindo e transferir suas metas de redução a outros agentes que serão recompensados pela manutenção do estoque de carbono na biomassa florestal em pé. A metodologia proposta poderia também servir para a aplicação de políticas de subsídios para o setor florestal, pois determina a distância do ótimo privado. Nesse sentido, o trabalho se assemelha aos que estudam os sistemas que minimizam os custos de abatimento a partir de subsídios, que representam a disponibilidade a pagar da sociedade para abater os GEE (Díaz Balteiro, 2001; Plantinga, 1999; Van Kooten, 1995; Hoen & Solberg, 1994).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método p^* proposto permite a definição de uma curva de oferta privada para carbono efetivamente retido.

As estimativas obtidas para a tonelada de carbono efetivamente retida definem os valores mínimos que deveriam ser pagos ao produtor florestal para induzir uma racional mudança no regime de manejo.

O preço do carbono abatido mostra-se sensível ao preço da celulose. As variáveis que influenciam esse preço - como distância aos mercados e custos de produção - podem determinar a inclusão da atividade ambiental na oferta da empresa, o que seria outro enfoque a ser incorporado em futuros estudos. As áreas florestais com alta capacidade de produção de biomassa e um baixo acesso aos mercados serão, possivelmente, as melhores candidatas para competir em venda de certificados de redução de emissão (CER).

O modelo utilizado de valoração do ativo ambiental mostrou-se adequado para valorar esse tipo de serviço na ausência de mercados desenvolvidos.

Também esse tipo de valoração poderia ser aplicado em estimações dos subsídios a serem pagos no setor florestal para gerar certificados de redução de emissão.

A metodologia proposta não permite avaliar custos de abatimento de carbono com escasso ou nulo valor comercial. Para aprimorar o método proposto de cálculo de

p^* , destaca-se a importância de incorporar o ciclo de vida dos produtos obtidos após a colheita.

A oferta de carbono abatido é maior para os sítios florestais mais produtivos, o que poderia ser estar provocando o efeito “leakage” pelo qual o projeto termina não abatendo carbono, sendo que as reduções atingidas pelo projeto ambiental são compensadas pelas emissões de outras atividades

A determinação do custo marginal de abatimento de carbono a partir da fórmula de Faustmann, proposto neste trabalho, permite determinar a oferta de carbono a partir do custo de oportunidade da floresta, concedendo maior peso às toneladas abatidas mais cedo na escala temporal. Isso permite calcular o preço de compensação pela manutenção do estoque florestal. Esse enunciado está alinhado com os estudos feitos por Nordhaus (1999), nos quais o custo marginal de redução é calculado como uma porcentagem da linha-base ou o princípio de imposto-subsídio aplicado por Romero (1998).

ANEXOS

ANEXO A – Parâmetros dos modelos e gráficos.

Modelo Gompertz (1832) usado para estimação do lenho e casca.

$$W = Ae^{-be^{-kt}} \quad \text{onde}$$

W= tamanho do organismo no tempo t (Mg ha⁻¹),

A= valor assintótico que o organismo pode atingir,

k= medida relativa de taxa de crescimento do organismo, expressa a
inclinação da curva,

b= escolha do tempo,

t= tempo em anos.

Tabela 14. Parâmetros da função Gompertz para casca e lenho. Sítios de alta e média produtividade.

	Sítios de Média Produtividade		Sítios de Alta Produtividade	
	CASCA	LENHO	CASCA	LENHO
a	1,422172242	3,48459	2,074177	4,303969
Lím inferior/Lím superior	1,22/1,62	3,27/3,69	1,45/2,69	3,73/4,87
b	6,9016	2,14878	3,81998	1,7696150
Lím inferior/Lím superior	1,64/12,16	0,83/3,46	0,95/6,68	0,399/3,139
k	0,0526126	0,0511411	0,03711675	0,487972
Lím inferior/Lím superior	0,030/0,07	0,029/0,072	0,011/0,063	0,140/0,835
R ² ajust.	0,79	0,79	0,80	0,76
Erro Standard do Estimador	0,18	0,23	0,21	0,30
Transformação	ln	ln	ln	ln
tempo	mes	mes	mes	mes

Tabela 15. Parâmetros para determinação de galhos.

	Sítios de Média Produtividade	Sítios de Alta Produtividade
	GALHOS	GALHOS
a	-0,967706	0,746784
b	0,512495	0,207694
R ² ajust.	0,64	0,37
Modelo	$\ln W = a + b \cdot \log t$	

Tabela 16. Parâmetros para determinação de raízes grossas.

	Sítios de Média	Sítios de Alta
a	0,383566	1,136575738
Lím inferior/Lím superior	0,229/0,5377	0,344/1,929
b	0,870356	0,562397346
Lím inferior/Lím superior	0,758/0,982	0,392/0,732
R ² ajust.	0,85	0,65
Erro Standard do Estimador	0,93	2,1
Modelo	$R = a \cdot W^b$

Figura 12 - Acúmulo de biomassa em partes da árvore. Sítios de média produtividade.

Figura 13 - Acúmulo de biomassa em partes da árvore. Sítios de alta produtividade.

ANEXO B – Valor da Tonelada e Seqüestro Marginal nas diferentes idades.

Tabela 17. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg⁻¹ CO₂-e). Sítios de média produtividade. Idade: 7 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	0,16	1,74	1,99	3,32	2,91
10	0,34	0,87	2,27	3,67	3,27
11	0,52	1,09	2,55	2,40	3,63
12	0,70	1,31	2,83	2,71	4,00
13	0,89	1,53	3,12	3,02	4,37

Tabela 18. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg⁻¹ CO₂-e). Sítios de alta produtividade. Idade: 7 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	0,02	0,58	1,14	1,70	1,08
10	0,21	0,82	1,42	0,95	1,42
11	0,40	1,05	1,71	1,25	1,76
12	0,59	1,29	0,99	1,55	2,11
13	0,78	1,54	1,25	1,85	2,45

Tabela 19. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg⁻¹ CO₂-e). Sítios de média produtividade. Idade: 8 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	1,70	3,96	4,48	6,43	6,03
10	1,95	2,83	4,87	6,91	6,54
11	2,20	3,14	5,27	5,24	7,06
12	2,46	3,46	5,68	5,68	7,59
13	2,72	3,78	6,09	6,13	8,12

Tabela 20. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg⁻¹ CO₂-e). Sítios de alta produtividade. Idade: 8 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	1,33	2,23	3,13	4,03	3,42
10	1,58	2,55	3,51	3,09	3,88
11	1,84	2,86	3,89	3,50	4,35
12	2,09	3,19	2,99	3,91	4,83
13	2,35	3,51	3,35	4,33	5,31

Tabela 21. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg-1 CO₂-e). Sítios de média produtividade. Idade: 9 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	3,50	6,59	7,40	10,08	9,68
10	3,85	5,14	7,95	10,76	10,40
11	4,20	5,57	8,52	8,60	11,13
12	4,56	6,02	9,09	9,22	11,87
13	4,93	6,47	9,68	9,86	12,64

Tabela 22. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg-1 CO₂-e). Sítios de alta produtividade. Idade: 9 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	2,95	4,29	5,63	6,97	6,32
10	3,29	4,72	6,15	5,75	6,96
11	3,64	5,16	6,68	6,31	7,60
12	4,00	5,61	5,51	6,89	8,26
13	4,36	6,06	6,01	7,47	8,93

Tabela 23. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg-1 CO₂-e). Sítios de média produtividade. Idade: 10 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	5,53	9,56	10,69	14,21	13,80
10	6,00	7,76	11,45	15,14	14,78
11	6,48	8,36	12,23	12,44	15,79
12	6,98	8,97	13,04	13,31	16,82
13	7,49	9,61	13,86	10,94	17,89

Tabela 24. Valor da tonelada de Carbono (US\$ Mg-1 CO₂-e). Sítios de alta produtividade. Idade: 10 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	4,89	6,76	8,64	10,51	9,80
10	5,36	7,35	9,35	8,96	10,66
11	5,84	7,96	10,07	9,73	11,54
12	6,33	8,58	8,59	10,52	12,45
13	6,84	9,21	9,28	11,33	13,38

Tabela 25. Seqüestro adicional de Carbono (Mg CO₂-e ha⁻¹). Sítios de média produtividade. Idade: 7 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	5,96	5,96	13,42	13,42	22,64
10	5,96	13,42	13,42	13,42	22,64
11	5,96	13,42	13,42	22,64	22,64
12	5,96	13,42	13,42	22,64	22,64
13	5,96	13,42	13,42	22,64	22,64

Tabela 26. Seqüestro adicional de Carbono (Mg CO₂-e ha⁻¹). Sítios de alta produtividade. Idade: 7 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	16,67	16,67	16,67	16,67	36,00
10	16,67	16,67	16,67	36,00	36,00
11	16,67	16,67	16,67	36,00	36,00
12	16,67	16,67	36,00	36,00	36,00
13	16,67	16,67	36,00	36,00	36,00

Tabela 27. Seqüestro adicional de Carbono (Mg CO₂-e ha⁻¹). Sítios de média produtividade. Idade: 8 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	14,44	14,44	21,90	21,90	31,13
10	14,44	21,90	21,90	21,90	31,13
11	14,44	21,90	21,90	31,13	31,13
12	14,44	21,90	21,90	31,13	31,13
13	14,44	21,90	21,90	31,13	31,13

Tabela 28. Seqüestro adicional de Carbono (Mg CO₂-e ha⁻¹). Sítios de alta produtividade. Idade: 8 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$m ⁻³)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	42,60	42,60	42,60	42,60	61,94
10	42,60	42,60	42,60	61,94	61,94
11	42,60	42,60	42,60	61,94	61,94
12	42,60	42,60	61,94	61,94	61,94
13	42,60	42,60	61,94	61,94	61,94

Tabela 29. Seqüestro adicional de Carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e ha}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 9 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose ($\text{US\$ m}^{-3}$)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	19,85	19,85	27,31	27,31	36,54
10	19,85	27,31	27,31	27,31	36,54
11	19,85	27,31	27,31	36,54	36,54
12	19,85	27,31	27,31	36,54	36,54
13	19,85	27,31	27,31	36,54	36,54

Tabela 30. Seqüestro adicional de Carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e ha}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 9 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose ($\text{US\$ m}^{-3}$)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	60,36	60,36	60,36	60,36	79,70
10	60,36	60,36	60,36	79,70	79,70
11	60,36	60,36	60,36	79,70	79,70
12	60,36	60,36	79,70	79,70	79,70
13	60,36	60,36	79,70	79,70	79,70

Tabela 31. Seqüestro adicional de Carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e ha}^{-1}$). Sítios de média produtividade. Idade: 10 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose ($\text{US\$ m}^{-3}$)				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	23,46	23,46	30,92	30,92	40,15
10	23,46	30,92	30,92	30,92	40,15
11	23,46	30,92	30,92	40,15	40,15
12	23,46	30,92	30,92	40,15	40,15
13	23,46	30,92	30,92	40,15	40,15

Tabela 32. Seqüestro adicional de Carbono ($\text{Mg CO}_2\text{-e ha}^{-1}$). Sítios de alta produtividade. Idade: 10 anos.

Taxa de desconto(%)	Preço Madeira para celulose (US\$ m^{-3})				
	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
9	72,17	72,17	72,17	72,17	91,50
10	72,17	72,17	72,17	91,50	91,50
11	72,17	72,17	72,17	91,50	91,50
12	72,17	72,17	91,50	91,50	91,50
13	72,17	72,17	91,50	91,50	91,50

ANEXO C – Gráficos.

Figura 14 - Oferta de carbono e preço da celulose. Sítio média produtividade.

Figura 15 – Oferta de carbono e preço da celulose. Sítio alta produtividade.

Figura 16 – Tendência do valor do carbono ante variações no preço da celulose e da taxa de desconto em sítios de média produtividade.

Figura 17 – Tendência do valor do carbono ante variações no preço da celulose e da taxa de desconto em sítios de alta produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, D.M.; ALIG, R.J.; McCARL, B.A. et al. Minimum cost strategies for sequestering carbon in forests. **Land Economics**, v.75, n.3, p.360-374, 1999.

ANTUNES, C.R. Análise da indústria de papel e celulose. Rio de Janeiro, 1998. 130p. Dissertação (M.S.) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BANCO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Celulose de mercado**. Rio de Janeiro, abr. 2001a. 7p. (Estudos setoriais: informes florestais)

BANCO DE DESENVOLVIMENTO ECONOMICO E SOCIAL. **A década de 90: mercado de celulose**. Rio de Janeiro, abr. 2001b. 38p. (Estudos setoriais: informes florestais)

CARVALHO, A.M.; CAMARGO, F.R.A. Variação da densidade básica entre procedências e progênies de *Eucalyptus saligna*. **O papel**, v.57, n.6, p.56-59, 1996.

CIAIS, P.; CRAMER, W.; JARVIS, P. et al. **Land use, land-use change and forestry: a special report of the IPCC**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 362p.

COMMERCIAL PROPERTY FINANCE BROKERS. **CLP. Structured finance**. http://www.clpuk.com/swap_frame.htm (02 Oct. 2002)

- CREEDY, J.; WURZBACHER, A. The economic value of a forested catchment with timber, water and carbon sequestration benefits. **Ecological Economics**, v.38, n.1, p.71-83, 2001.
- DE JONG, B.H.J.; TIPPER, R.; MONTROYA-GÓMEZ, G. An economic analysis of the potential for carbon sequestration by forests: evidence from southern Mexico. **Ecological Economics**, v.33, n.2, p.313-327, 2000.
- DÍAZ BALTEIRO, L.; ROMERO, C. Forest management and carbon captured: analytical aspects and policy implications. **Investigación Agropecuaria: sistemas de recursos forestales**, Fuera de Serie, n.1, p.153-165, 2001.
- DURY, S.J.; POLGLASE, P.J.; VERCOE, T. **Greenhouse resource kit for private forest growers: agriculture, fisheries and forestry**. Canberra: AFFA, 2002. 95p.
- FAUSTMANN, M. On the determination of the value which forest land and immature stands pose for forestry. In: GANE, M. (Ed.). **Martin Faustmann and the evolution of discounted cash flows**. Oxford: Oxford Institute, 1849. 54p. (Paper, 42)
- FEARNSIDE, P. Global warming response options in Brazil's forest sector: comparison of project-level costs and benefits. **Biomass and Bioenergy**, v.8, n.5, p.309-322, 1995.
- FENG, H. The dynamics of carbon sequestration and measures of cost-effectiveness. Iowa: Iowa State University, 2002. (Working Paper, 02-WP 320) <http://www.card.iastate.edu> (05 Dec. 2002)
- GOMPERTZ, B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. **Philosophical Transactions**, v.123, p.513-585, 1832.

- GONG, P.; KRISTRÖN, B. Regulating forest rotation to increase CO₂ sequestration. In: CONFERENCE OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS, 5., Ulvön, 1998. **Anais**. Ulvön: SLU, 1998. 23p.
- GREGERSEN, H.M.; ARNOLD, A.L. ; LUNDGREN, A.L.; CONTRERAS, A. **Valoración de los bosques: contexto, problemas, directrices**. Roma: FAO, 1997. 69p. (Estudio FAO Montes, 127)
- HOEN, H.F.; SOLBERG, B. Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. **Forest Science**, v.4, n.3, p.429-451, 1994.
- INSTITUTO PESQUISAS ECONÔMICAS – IPEA. **Ipeadata**. <http://www.ipeadata.gov.br> (03 jul. 2003)
- KARMACHARYA, S.B.; SINGH, K.P. Biomass and net production of teak plantations in a dry tropical region in India. **Forest Ecology and Management**, v.55, p.233-247, 1992.
- KUNDHLANDE, G.; ADAMOWICZ, W.L.; MAPAURE, I. Valuing ecological Services in a savanna ecosystem: a case study from Zimbabwe. **Ecological Economics**, v.33, n.3, p.401-413, 2000.
- LARROBLA, R. Modelos forestales para fijación de carbono y producción de madera en Argentina. **Sagpya**, n.8, p.3-7, 1998.
- LEWIS, D.K.; TURNER, D.P.; WINJUM, J.K. An inventory-based procedure to estimate economic cost of forest management on a regional scale to conserve and sequester atmospheric carbon. **Ecological Economics**, v.16, n.1, p.35-49, 1996.

LI, Z.; APPS, M.J.; BANFIELD, E.; KURZ, W.A. Estimating net primary production of forests in the Canadian Prairie Provinces using an inventory-based carbon budget model. **Canadian Journal Forestry Research**, v.32, n.1, p.161-169, 2002.

LOZA-BALBUENA, I.L. Impacto en la performance económica de proyectos forestales: estudio de caso para *Pinus taeda* en Uruguay. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL MEDICION Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EM ECOSISTEMAS FORESTALES, Valdivia, 2001. **Anais**. Vienna: IUFRO, 2002. p.145-153.

URUGUAY. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Dirección de Medio Ambiente, Unidad de Cambio Climático. **Estudio de apoyo a la aplicación del mecanismo para el desarrollo limpio del protocolo de Kioto en Uruguay**. Montevideo: MVOTMA, 2002. 164p.

MOULTON, R.J; RICHARDS, K.R. Costs of sequestering carbon through tree planting and forest management in the United States. Washington: Department of Agriculture, Forest Service, Dec. 1990. 47p. (General Technical Report, 58)

NORDHAUS, W.D. The cost of slowing climate change: a survey. **Energy Journal**, v.12, n.1, p.37-65, 1991.

PAPERAGE. **Pulp, paper markets eye slow start to 2003**.
http://www.paperage.com/news/12_31_2002foex.html (02 Jan. 2003)

PAUL, K.I.; POLGLASE, P.J.; NYAKUENGAMA, J.G. Change in soil carbon following afforestation. **Forest Ecology and Management**, v.168, p.241-257, 2002.

WORLD BANK. Prototype Carbon Fund – PCF. **Prototypecarbonfund**.
http://www.prototypecarbonfund.org/html/ar_home.htm (06 Jan. 2003)

PLANTINGA, A.J.; MAULDIN, T.; MILLER, D. An econometric analysis of the costs of sequestering carbon in forests. **American Journal of Agricultural Economics**, v.81, n.4, p.812-824, Nov. 1999.

ROCHA, M.T. Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT Piracicaba, 2003. 196p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ROCHA, M.T.; MELLO, P.C. de; MANFRINATO, W. A comercialização do carbono. **Revista BM&F**, n.143, p.1-6, 2002.

ROMERO, C. **Economía de los recursos ambientales y naturales**. Madrid: Alianza, 1994. 189p.

ROMERO, C. Multicriteria decision analysis and environmental economics: an approximation. **European Journal of Operational Research**, v.96, n.1, p.81-99, 1996.

ROMERO, C.; ROS, V.; DÍAZ BALTEIRO, L. Optimal forest rotation age when carbon captured is considered: theory and applications. **Journal of the Operational Research Society**, v.49, p.121-131, 1998.

SAMUELSON, P.A. Economics of forestry in an evolving society. **Economic Inquiry**, v.14, p.466-492, 1976.

STAVINS, R.N.; NORDHAUS, W.D. The costs of carbon sequestration. a revealed-preference approach **American Economic Review**, v.89, n.4, p.994-1009, 1999.

STAPE, J.L. Production ecology of clonal *EUCALYPTUS* plantations in northeastern Brazil. Fort Collins, 2002. 237p. Thesis (Ph.D.) – Colorado State University.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE.
Report of the eighth conference of the parties to the un framework convention on climate change. COP8 (UNFCCC). <http://unfccc.int/cop8> (20 Mar. 2002)

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE.
Report of the seventh conference of the parties to the un framework convention on climate change. COP7 (UNFCCC). <http://unfccc.int/cop7> (20 Mar. de 2002)

VAN KOOTEN, G.C.; BINKLEY, C.S.; DELCOURT, G. Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. **American Journal of Agricultural Economics**, v.77, v.2, p.365-374, 1995.

VILARDAGA, V. Mudança histórica no preço da celulose. **IPEF Clipping de notícias florestais**. <http://www.ipef.br/servicos/clipping> (15 dez. 2002)

VITAL, B.R.; BASTOS FILHO, J.G.; VALENTE, O.F. Efeito da idade da árvore sobre o rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo de carvão de Eucalyptus. **Revista Árvore**, v.9, n.2, p.180-185, 1985.

WATSON, R.T; NOBLE, I.R.; BOLIN, B. et al. **Land use, land-use change, and forestry: a special report of the IPCC**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 362p.