4
Discussão de Trabalhos Anteriores

Esse capítulo expõe o modelo tradicionalmente usado para cálculo do valor da terra e para a determinação da idade de corte economicamente ótima, conhecido como fórmula de Faustmann, e cita alguns trabalhos ulteriores que buscaram generalizar seu uso em ambientes de incerteza. Em seguida, resume alguns trabalhos que estudam o impacto do aquecimento global na economia e examinam as implicações dos créditos de carbono em setores afetados. Desses trabalhos foram tirados alguns dos modelos usados nessa dissertação.

4.1.
Modelos de Determinação da Idade Ótima de Corte e Valor da Terra

A fórmula atribuída a Faustmann[6], também conhecida como Valor Esperado da Terra (VET), vem sendo usada por administradores de recursos florestais há mais de 150 anos para calcular idades de corte economicamente ótimas e preços máximos de terrenos descampados. Ela permite calcular o valor de uma unidade vazia de terreno usado unicamente em exploração florestal, sobre um horizonte de tempo infinito e com rotações de mesma duração. A figura 5 ilustra de forma simples o modelo de Faustmann. Nela, *R* representa a duração da rotação.

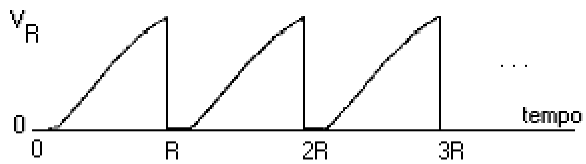

Figura 5: Crescimento e corte no modelo determinístico de Faustmann (Fonte: adaptado de Buongiorno, 2001)

---

[6] Faustmann, M. *Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry.* Journal of Forest Economics, v.1, p.7-44, 1995.

Segundo Rodriguez, Bueno e Rodrigues (1997), a fórmula de Faustmann é dada pela seguinte relação:

$$VET = \frac{P \cdot V(R) - c \cdot e^{r \cdot t}}{(e^{r \cdot t} - 1)} \tag{25}$$

onde P é o preço da madeira por unidade de volume, líquido de custos de desbaste; $V(R)$, o volume de madeira por unidade de área na idade R; c corresponde ao custo de reflorestamento; e r é a taxa de desconto instantânea.

O valor esperado da terra corresponde ao valor presente da série infinita de receitas líquidas obtidas no final de ciclos de produção florestal que se repetirão *ad infinitum*. A idade de corte economicamente ótima é calculada nesse modelo como sendo a idade que maximiza o VET. Aplicando as condições de primeira ordem obtemos[7]:

$$\frac{V'(R)}{V(R) - \frac{c}{P}} = \frac{r}{1 - e^{-rt}} \tag{26}$$

Ou seja, o valor de VET será máximo no instante t que tornar a igualdade acima verdadeira. Esse seria o momento ótimo de corte das árvores.

Trata-se de um modelo puramente determinístico, tanto em seus parâmetros biológicos quanto econômicos. A taxa de crescimento das árvores é suposta conhecida, bem como todos os preços e custos envolvidos. Também é um modelo estático no sentido de que a seqüência e o *timing* das decisões serão sempre os mesmos. De maneira resumida, o modelo de Faustmann considera que (Rodriguez, Bueno e Rodrigues, 1997):

- o terreno será utilizado unicamente para a condução de uma série infinita de rotações florestais idênticas;
- o empreendedor florestal pode adquirir ou tomar emprestados recursos a uma taxa de juros conhecida e constante ao longo do tempo;
- a demanda por madeira é conhecida, constante e perfeitamente elástica;

[7] A demonstração encontra-se no Apêndice C.

- a função de produção florestal e os custos de reforma e manutenção da floresta são conhecidos e constantes no tempo; e
- a floresta é imediatamente reformada após o corte e os ciclos se repetem indefinidamente, apresentando sempre os mesmos níveis de produção e tecnologia.

Os autores demonstram que, para o caso de uma única rotação, nem sempre a idade de corte recomendada por critérios econômicos resulta em rotações florestais mais curtas do que a idade recomendada pelo critério volumétrico, uma idéia bastante generalizada no meio de planejamento florestal.

Segundo os autores, sob o ponto de vista volumétrico, a idade ótima de corte é a que resulta no maior volume anual médio ao longo de diversas rotações. Por resultar em um volume anual médio maior do que aquele que seria obtido se a floresta fosse cortada em qualquer outra idade, a decisão de cortá-la quando o incremento médio anual (IMA) for máximo se justifica. Matematicamente, idade ótima de corte é aquela que maximiza o IMA:

$$\max IMA = \frac{V(t)}{t} \tag{27}$$

onde *V(t)* é o volume da floresta no instante *t*.

Da condição de primeira ordem obtém-se que a condição para máximo é que:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{V(t)}{t} \tag{28}$$

ou seja, a idade ótima será o momento em que o IMA for máximo e isso se dará quando ele for igual ao incremento corrente anual (ICA), ou seja, quando ICA=IMA. Já do ponto de vista econômico, os autores utilizam o modelo de Faustmann e a idade de corte economicamente ótima é aquela que soluciona a eq. (26).

Os autores seguem analisando os casos em que as rotações ótimas calculadas pelos dois critérios são iguais e concluem que, contrariamente à crença comum, existirão situações nas quais a rotação economicamente ótima

(REO) é maior do que a rotação volumetricamente ótima (RVO). Isso ocorrerá quando a taxa de desconto utilizada for inferior ou igual ao inverso da idade para a qual o IMA é máximo. Esse resultado mostra uma diferença interessante entre empreendimentos florestais em países tropicais e em países temperados. Visto que no Brasil são comuns cultivos de eucaliptos com IMA máximo por volta dos 6 ou 7 anos, existem situações nas quais taxas de juros abaixo de 14,3% e 16,7% recomendariam REO mais longas do que as RVO. Enquanto isso, em países de clima temperado, onde as florestas possuem crescimento mais lento, às vezes com REO superiores a 100 anos, REO mais longas que RVO só ocorreriam para taxas de descontos menores que 1%.

Em seguida, fazem uma análise gráfica do problema. Para representarem as curvas de produção volumétrica *V(t)* eles fazem uso do modelo log-recíproco de Schumacher [8]:

$$V(t) = \alpha \cdot e^{\frac{-\beta}{t}} \tag{29}$$

onde os parâmetros α e β são obtidos pelo ajuste da transformação linear do modelo, $\ln V = \ln \alpha - \beta \frac{1}{t}$, a um conjunto de dados.

Buongiorno (2001) faz uma generalização do modelo de Faustmann usando processos de decisão de Markov, admitindo que os estados futuros da floresta e dos preços dos produtos florestais são conhecidos apenas como distribuições de probabilidades de passagem de um estado para outro. Nesse tipo de modelo, as leis que regem o movimento entre estados que representam os diferentes preços possíveis são cadeias de Markov.

A formulação estocástica da fórmula de Faustmann é análoga à formulação determinística da eq. (25) no sentido de que ela busca a seqüência de decisões que maximize o valor descontado esperado dos rendimentos sob um horizonte infinito, dada uma condição inicial específica. A formulação geral da função objeto é:

---

[8] Schumacher, F.X. *A new growth curve and its application to timber yield studies.* Journal of Forestry, v.37, p.819-820, 1939.

$$\underset{d_t}{Max}\, V(X_0) = E\left[\sum_{t=0}^{\infty} r(X_t, d_t)\beta^t \middle| X_0\right] \tag{30}$$

onde X_t representa o estado do sistema em t que, em vez de ser determinístico, passa a ser uma variável aleatória; d_t é a decisão no instante t; r é o retorno instantâneo da decisão dado um estado específico; e β é o fator de desconto $\beta=(1+g)^{-T}$, no qual g é a taxa de juros e, T, o número de anos entre as tomadas de decisão.

Segundo esse modelo, as soluções dos processos de decisão markovianos fornecem a melhor decisão para cada estado bem como o valor da floresta (terra e árvores), dado o estado da floresta. Dessa maneira ele incorpora ao modelo de Faustmann a aleatoriedade, fator chave tanto na economia como na biologia, mas que faltava àquele modelo.

Também procurando levar em consideração a incerteza na avaliação de recursos florestais, Morck, Schwartz e Stangeland (1989) estudam o problema da determinação da duração ótima de um investimento florestal, ou seja, o momento ótimo de corte das árvores. Em seu modelo, consideram o preço (P) e o estoque de madeira (I) de uma floresta de pinheiros brancos no Canadá como variáveis estocásticas seguindo processos de Itô distintos:

$$\frac{d\tilde{P}}{P} = \mu_P(P,t)\cdot dt + \sigma_P(P,t)\cdot d\tilde{z}_P \tag{31}$$

$$d\tilde{I} = [\mu_I(I,t) - q(P,I,t)]\cdot dt + \sigma_I(I,t)\cdot d\tilde{z}_I \tag{32}$$

onde $\tilde{z}_P$ e $\tilde{z}_I$ são processos de Wiener em $\Re^2$ possivelmente correlacionados.

Sendo tanto o preço como o estoque de madeira variáveis estocásticas, o problema torna-se não somente estocástico como também assimétrico. A assimetria é devida à possibilidade de se exercer a opção de parar a produção de madeira temporariamente se os preços estiverem desfavoráveis.

Nessa modelagem, a taxa de variação esperada nos estoques da floresta, μ_I, é instantaneamente reduzida por $q(P,I,t)$, a quantidade instantânea de madeira produzida denominada taxa de corte. Essa taxa q é a variável de controle ótimo estocástico e é determinada implicitamente pelo modelo junto com o valor da floresta. O valor de um arrendamento florestal seria, portanto, o valor de uma opção de derrubar as árvores no momento mais vantajoso.

Nesse mesmo contexto de incerteza quanto ao preço e ao estoque de madeira, Levi (1996) avaliou concessões para a exploração de reservas florestais por períodos de tempo finitos, determinando a política de controle ótimo estocástico, isto é, o padrão de corte das árvores em função do preço da madeira e da quantidade de madeira estocada na biomassa florestal em determinado instante, ambos modelados como processos de Itô. Para isso, usou como exemplo uma floresta de eucaliptos no estado do Espírito Santo, trazendo sua análise para mais próximo da realidade brasileira.

Encarando sob outro prisma, Conrad (1997) utiliza a abordagem de valor de uma opção para analisar a decisão de preservar uma floresta centenária em um parque nacional nos EUA. No caso estudado, a floresta possui um estoque de madeira e gera um fluxo de amenidades, representando a soma de vários benefícios como habitat para a fauna local, controle de inundações e visitação. O autor considera o volume de madeira e seu valor comercial como sendo conhecidos e constantes, enquanto os valores futuros da amenidade gerada são incertos e seguem um movimento geométrico browniano. O modelo também considera o fluxo de amenidades (não observável) como sendo proporcional ao fluxo de visitação do parque (observável), permitindo assim o cálculo dos parâmetros de *drift* e volatilidade do MGB. Com isto o autor deriva soluções analíticas para o valor da amenidade que justificaria a preservação da floresta em detrimento de sua derrubada para comercialização de sua madeira (fronteira crítica).

Insley e Rollins (2002) usam a abordagem das opções reais para examinar questões de ordem práticas surgidas no gerenciamento de florestas estatais no Canadá, com respeito a propostas de aumentar a produção de madeira através de um gerenciamento florestal intensivo. Existindo volatilidade no preço da madeira, o valor da floresta aumenta pois assim existirá flexibilidade quanto às datas de desbaste, que serão determinadas com base no volume e preço da madeira naquele instante. Os autores, então, desenvolvem um modelo de opções reais de dois fatores para a decisão de corte considerando infinitas rotações e modelando o preço da madeira com um processo estocástico de reversão à média:

$$dP = \eta(\overline{P} - P)dt + \sigma P dz \qquad (33)$$

A decisão de cortar as árvores é então formulada como um problema de paralisação temporária, no qual o administrador deve decidir em cada período se é preferível desbastá-las ou esperar até o período seguinte. O processo de decisão pode ser descrito por uma equação de Bellman:

$$V(t,P,Q) = Max\left\{(P-C)Q + V(t,P,0);\ A + \frac{E[V(t+\Delta t, P, Q)]}{(1+\rho)}\right\} \qquad (34)$$

onde V é o valor da oportunidade de corte; P é o preço da madeira; C corresponde ao custo de corte por unidade; Q, ao volume total de madeira da floresta; A é o valor da amenidade gerada pela floresta de pé (por exemplo, o uso como área de recreação) líquido dos custos de gerenciamento por período; e ρ é a taxa de desconto anual.

O modelo é usando, então, para calcular o valor de uma floresta canadense assumindo total flexibilidade quanto ao instante de corte das árvores. Os autores comparam, então, esse valor com o valor da floresta calculado considerando-se limitações impostas pelo Estado quanto ao momento de desbaste. Os autores fazem ainda essa análise para três diferentes níveis de intensidade de gerenciamento florestal (extensivo, básico e intensivo).

4.2.
Efeito Estufa e Créditos de Carbono

Nordhaus (1991) estuda o impacto de políticas que visam a mitigar o efeito estufa sobre a economia num cenário global idealizado para a metade do século XXI. Seu modelo simplificado do processo de ajuste de temperatura possui a seguinte forma:

$$\dot{T}(t) = \alpha\{\mu M(t) - T(t)\} \tag{35}$$

$$\dot{M}(t) = \beta E(t) - \delta M(t) \tag{36}$$

onde *T(t)* é o aumento da temperatura média global na superfície terrestre devido ao aumento na concentração de GEE; *M(t)* é a concentração atmosférica antropogênica de GEE de equivalente em CO_2.; *E(t)* são as emissões antropogênicas de GEE também em CO_2 equivalente; μ e α são parâmetros do modelo de aquecimento; β é parâmetro relativo à emissão de CO_2-equivalente; e δ é a taxa anual de remoção de CO_2-equivalente da atmosfera. Em seguida, supõe que a economia se encontra em estado estacionário de recursos, isto é, todos os fluxos físicos na economia global são constantes, muito embora o valor real de atividade econômica esteja crescendo. Nesse estado, o consumo *per capita* no instante *t*, *c(t)*, é dado por:

$$c(t) = y^* e^{ht}\left[g(E^*) - \phi(T^*)\right] \tag{37}$$

onde y^* é uma constante; y^*e^{ht} é o produto *per capita* da economia antes de qualquer redução de emissões e sem danos ao clima; *h* é a taxa de crescimento da economia; *g(E)* representa o custo de redução das emissões; e $\phi(T)$ representa a função dano devido ao efeito estufa. Os asteriscos representam as variáveis no estado estacionário (*steady state*).

O nível ótimo de redução de emissões nesse modelo seria dado quando:

$$g'(E^*) = \mu\beta\phi'(T^*)\Gamma \tag{38}$$

onde Γ é um fator de valor presente e é dado por $\Gamma = \frac{\alpha}{(r+\delta-h)(r+\alpha-h)}$. A eq. (38) afirma que o nível ótimo de redução de GEE ocorre quando o custo marginal corrente de redução das emissões de GEE se iguala ao valor presente do dano marginal devido a maiores concentrações.

Guthrie e Kumareswaran (2003) examinam a capacidade de subsídios e taxas sobre o carbono incentivarem os proprietários de florestas a aumentarem sua área verde e a prolongarem suas rotações, ambas atitudes que aumentariam o armazenamento de carbono e ajudariam a mitigar as mudanças climáticas. Os autores argumentam que, sob o Protocolo de Quioto, a distribuição de créditos de carbono seria necessária caso se desejasse algum tipo de incentivo. Comparam, então, três diferentes esquemas de alocação desses créditos para esses proprietários: (i) um pagamento *lump-sum*, efetuado no início da plantação e que deve ser devolvido no momento do desbaste; (ii) um regime de fluxo, no qual os créditos seriam alocados proporcionalmente à mudança no estoque de carbono na floresta e devolvidos no momento do corte das árvores; e (iii) um regime de estoque, onde esses créditos seriam alocados proporcionalmente ao estoque total de carbono da floresta, sendo que nesse último o proprietário não precisaria devolver os créditos acumulados no momento do corte.

Em seu modelo, os autores consideram o volume de madeira como sendo determinístico, estando toda a incerteza concentrada no preço de mercado da madeira, que é modelado como seguindo um processo de Itô. Em seguida, utilizando um modelo de opções reais, eles examinam os efeitos da incerteza no preço futuro sobre o *timing* dos desbastes, sobre as decisões de replantio-abandono e sobre o valor da floresta. Terminam por concluir que o esquema *lump-sum*, que é o mais simples, dá forte incentivo ao proprietário para não abandonar o empreendimento em detrimento de outro uso alternativo para a terra. No entanto, ao fazer a opção de abandono menos atrativa, isso diminui o valor da opção de adiar o corte das árvores, levando a rotações mais breves do que caso não houvesse créditos de carbono. Os outros dois esquemas alocacionais (fluxo e estoque de carbono) induzem a comportamentos similares por parte dos proprietários de terras. Sob esses esquemas, no entanto, o replantio é adiado, diferentemente do regime *lump-sum*. Ambos desestimulam o corte de árvores e encorajam rotações mais longas, levando a um aumento no seqüestro de carbono.

Lambie (2002) faz uma análise, sob a luz da Teoria de Opções Reais, de como os investimentos de firmas poluentes são afetados pela distribuição de créditos de carbono numa política de controle de emissões de GEE. O autor usa como exemplo uma firma australiana de geração termelétrica a carvão que deve tomar a decisão de investir numa nova planta geradora frente a dois possíveis cenários em relação à forma de distribuição de permissões de emissão transacionáveis. No primeiro cenário, a firma recebe gratuitamente as permissões de emissão necessárias; no segundo, ela é obrigada a adquiri-los a preço de mercado. A incerteza do exemplo está restrita aos preços do insumo (carvão) e do produto final (eletricidade).

Sohngen e Mendelsohn (2003) desenvolvem um modelo teórico de controle para seqüestro de carbono que visa a explorar o papel potencial das florestas na mitigação do efeito estufa. De maneira a lidar com a questão da permanência do carbono seqüestrado, o modelo usa o preço anual de aluguel de carbono, definido como o valor do armazenamento de uma tonelada de carbono pelo período de um ano, no lugar do preço do carbono. Os autores mostram que, conforme o CO_2 se acumula na atmosfera, o preço de aluguel do carbono seqüestrado deve aumentar com o tempo e, através de um modelo empírico, mostram que o seqüestro de carbono é custoso, mas que proprietários de terras podem seqüestrar uma quantidade substancial de CO_2 simplesmente aumentado suas áreas florestadas ou prolongando suas rotações. Os autores citam alguns estudos que prevêem que o seqüestro de carbono por florestas corresponderia a cerca de um terço da redução total de CO_2, e que as florestas tropicais corresponderiam a mais de dois terços dessa fração.

Cunha-e-Sá e Rosa (2004) procuram analisar o problema do proprietário de uma floresta de eucaliptos em Portugal em determinar a lucratividade da produção de madeira de eucalipto considerando os benefícios do seqüestro de carbono pela floresta. Os autores frisam que, por fazer parte do Anexo B do Protocolo de Quioto e por possuir um dos menores índices de emissões de GEE *per capita* dentre os países ditos industrializados, Portugal possui grande potencial não só para atingir suas metas de redução como também para desenvolver atividades de implementação conjunta com outros países desenvolvidos.

Para tanto, os autores analisam o efeito de taxas e subsídios aplicados no carbono (seqüestrado ou liberado) sobre a duração ótima da rotação em eucaliptais portugueses. Utilizam para essa análise o modelo de Faustmann modificado de modo a introduzir o seqüestro de carbono. São feitos dois ajustes ao modelo: primeiro, convertem a estimativa de volume de madeira industrializável numa estimativa da biomassa florestal total; em seguida, estimam a quantidade de carbono nessa biomassa. A percepção da mudança no estoque de carbono torna-se, portanto, relevante para se levarem em consideração os benefícios do seqüestro de carbono. Os autores supõem em seu modelo que agências públicas providenciarão o pagamento de um subsídio anual pelo volume total de CO_2 seqüestrado e, analogamente, cobrarão uma taxa no momento do desbaste igual aos custos externos do carbono lançado na atmosfera, internalizando assim os benefícios e custos externos sob a perspectiva dos proprietários das florestas.

O valor presente dos benefícios do seqüestro de carbono sob uma rotação de duração *T* é representado por:

$$CB_0 = \int_0^T P_C \alpha_i v'_i(t) e^{-rt} dt \tag{39}$$

onde $v_i(t)$ representa o volume de madeira na idade *t*; α é um fator que converte de volume de madeira para volume de carbono; P_C corresponde ao valor social do carbono seqüestrado; *r* é a taxa de desconto; e o subscrito *i* considera as várias possíveis espécies.

Seguindo a metodologia proposta por van Kooten[9] et al., o custo externo da liberação de uma unidade de carbono é subtraído do valor líquido de madeira no instante *t* para a espécie *i*:

$$V_0 = P_i v_i(t) e^{-rt} - P_C \alpha_i (1-\beta_i) v_i(t) e^{-rt} \tag{40}$$

[9] van Kooten, G.C; Binckley, 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, n.2, pp. 365-374, 1995.

Dependendo do uso a ser feito da madeira, a fração utilizada em estruturas de armazenamento de longo prazo, β, poderá variar. Caso β=0, todo o carbono será liberado de volta à atmosfera depois do corte, enquanto se β=1 não haverá custos sociais devidos à liberação de carbono.

O valor presente dos benefícios totais, isto é, da produção de madeira e do seqüestro de carbono sob múltiplas rotações de duração *T* é dado, então, por:

$$PV_0 = \frac{P_i v_i(T)e^{-rT} - P_C\alpha_i(1-\beta_i)v_i(T)e^{-rT} + \int_0^T P_C\alpha_i v'_i(t)e^{-rt}dt}{(1-e^{-rT})} \tag{41}$$

onde $P_C\alpha_i$ representa o subsídio anual para cada m³ de madeira acrescido ao estoque e $P_C\alpha_i(1\text{-}\beta)$ é a taxa cobrada para cada m³ de madeira desbastada.

Maximizando-se a eq. (41) com relação a *T*, assumindo que as condições de segunda ordem para um máximo são válidas, obtém-se a condição de primeira ordem da qual pode-se derivar a duração ótima para a rotação, *T**:

$$G'_T = \frac{r}{1-e^{-rT}}\left[G(T) - P_C\alpha_i(1-\beta_i)v_i(T) + \int_0^T P_C\alpha_i v'_i(t)e^{-rt}dt\right] - P_C\alpha_i\beta_i v'_i(T) \tag{42}$$

onde $G(t) = P_i v_i(t)$. Reescrevendo:

$$\frac{G'_T}{G(T)} = \frac{r}{1-e^{-rT}} + \frac{\frac{r}{1-e^{-rT}}\left[\int_0^T P_C\alpha_i v'_i(t)e^{-rt}dt - P_C\alpha_i(1-\beta_i)v_i(T)\right] - P_C\alpha_i\beta_i v'_i(T)}{G(T)} \tag{43}$$

ou, sob outra forma:

$$\frac{V'_T}{V(T)} = \frac{r}{1-e^{-rT}} + \frac{\frac{r}{1-e^{-rT}}\int_0^T P_C\alpha_i v'_i(t)e^{-rt}dt - P_C\alpha_i v_i(T)}{V(T)} \tag{44}$$

onde $V(T) = P_i v_i(T)e^{-rT} - P_C\alpha_i(1-\beta_i)v_i(T)e^{-rT}$.

A eq. (43) esclarece o papel dos benefícios oriundos do carbono e do uso da madeira na decisão ótima quanto à duração da rotação. O segundo termo do lado direito da eq. (43) introduz um ”balanço de carbono”. Caso esse termo seja negativo, isso prolongará a duração da rotação; caso contrário, a rotação será abreviada. O resultado final dependerá tanto do valor social do carbono liberado no instante *T** como de mudanças na percepção quanto ao estoque de carbono, também em *T**. Em relação a β, para valores elevados desse parâmetro a duração da rotação será abreviada pois o custo social da liberação de carbono no momento do desbaste será menor.

A partir desses resultados, outra maneira de explicar o papel do carbono é reescrevendo-se a eq. (44):

$$V'_T = V(T)\left[r - P_C\alpha\frac{V'_T}{V(T)}\right] + rPV_0 \qquad (45)$$

onde $V'_T = P_C v'(T) - P_C\alpha(1-\beta)v'(T)$, avaliado em *T=T**. Essa expressão mostra que os benefícios obtidos postergando-se o desbaste mais um período têm que compensar o custo de oportunidade de se deixar as árvores de pé mais o custo de aluguel do terreno. A principal diferença resultante de se introduzir benefícios oriundos do carbono, concluem os autores, é o fato de a taxa de retorno de investimentos florestais ter que ser ajustada como conseqüência do seqüestro de carbono.

Os autores aplicam o modelo para florestas de eucalipto portuguesas e concluem que, uma vez que os benefícios oriundos do carbono seqüestrado são internalizados, obtém-se um “balanço de carbono” que afeta a escolha da rotação ótima. Apesar de os pagamentos devidos aos benefícios do seqüestro de CO_2 criarem um incentivo ao corte prematuro, tanto o custo das emissões como a tendência de crescimento das árvores tenderão a prolongar as rotações.

Cairns e Lasserre (2004), fixando-se no caso de atividades florestais, argumentam que, qualquer que seja o instrumento econômico usado para incentivar a redução de CO_2 para níveis socialmente ótimos (taxas sobre emissões ou créditos de carbono transacionáveis), torna-se necessário contabilizar os efeitos do carbono atmosférico e o total de carbono assimilado pela floresta (*green accounting*). Essa contabilização deve levar em consideração o risco de destruição por incêndios florestais ou deterioração por pragas, dois eventos que liberariam carbono de volta para a atmosfera.

Os autores, então, propõem um modelo de contabilização de carbono fixado por uma atividade de florestação que leva em consideração o risco de destruição por incêndio ou pragas bem como a utilização que será feita da madeira. Com base nesse modelo, sugerem políticas a serem tomadas pelas autoridades responsáveis pela distribuição de créditos de carbono.

Para construir esse modelo, consideram uma floresta que é continuamente plantada, derrubada e replantada cuja n-ésima rotação foi plantada em t_n (normalizando t_0=0). Essa floresta poderia tanto ser cortada num instante t_n+T_n, onde T_n é a duração da n-ésima rotação, como atacada por algum evento destrutivo (praga ou incêndio) em $t < t_n+T_n$. Um evento desse tipo que destruísse completamente a floresta é modelado como um evento de Poisson com taxa ρ suposta constante. Nesse caso, a probabilidade de a n-ésima rotação sobreviver ao instante t seria igual a $e^{-\rho(t-t_n)}$ e a probabilidade de ocorrer um incêndio no intervalo (t, $t+dt$) seria $\rho e^{-\rho(t-t_n)}$. No caso de uma destruição apenas parcial de uma fração $\phi \in$ (0,1) da floresta, o evento seria modelada como um Poisson com taxa π em um intervalo (t, $t+dt$).

Nesse modelo, a quantidade de carbono fixada na biomassa da floresta no instante t seria dada por $f(t - t_n)$; logo, a taxa de crescimento instantânea seria $\dot{f}(t-t_n)$, abstraindo-se de possíveis danos parciais durante a rotação. Sobrevivendo a floresta até a idade T_n, nesse momento ocorrerá o corte das árvores; delas, somente uma fração λ_n é utilizável, enquanto a fração restante (1-λ_n) será descartada transformando-se imediatamente em dióxido de carbono (por incineração ou decomposição, por exemplo); essa fração λ_n é determinada pela escolha dos insumos (redução do desperdício) e pelo *mix* de produtos feitos a partir da madeira. A parte utilizável é empregada na produção de um *mix* de produtos de madeira em que a proporção de cada produto i seria Γ_{ni} e sua taxa de decaimento (retorno do carbono para a atmosfera por decomposição), γ_{ni}, assumida constante. Por simplicidade, os autores optaram por considerar um vetor de produtos unidimensional: $\Gamma_{ni} = \Gamma = 1$ e $\gamma_{ni} = \gamma_n$.

O estoque de carbono em uma floresta é um tipo de capital, enquanto fluxos como *f(t)* são um tipo de investimento. Nesse contexto, os autores consideram duas maneiras possíveis de se avaliarem os créditos de carbono em um instante $t \geq 0$, dado o valor de uma emissão como sendo *p(t)*: o primeiro método avalia (1) o lucro sobre e a depreciação do valor do estoque de carbono corrente na floresta e (2) a depreciação do valor do estoque contido em produtos florestais previamente produzidos. Isso envolveria imputar e capitalizar fluxos futuros sob um horizonte de incertezas e então calcular as taxas de mudança dos valores capitalizados. No caso de seqüestro de carbono, os créditos seriam dados imediatamente pelo valor presente do carbono a ser seqüestrado por todas as rotações futuras.

O segundo método, teoricamente igual ao primeiro porém muito mais simples, envolve medir apenas os fluxos correntes de valor (lucro sobre e depreciação dos estoques) a preços correntes, em vez de primeiro computar os valores do estoque (como valores presentes de fluxos avaliados a preços futuros) e só então calcular a derivada. Seja δ_m^s, $m<n$, um indexador das rotações passadas que sobreviveram até a maturidade e foram cortadas, ou seja, $\delta_m^s=1$ se a m-ésima rotação sobreviveu e $\delta_m^s=0$, caso contrário. Similarmente, seja δ_m^p um índice das rotações nas quais houve destruição parcial (de tal forma que $\delta_m^p=0$ caso não tenha havido destruição parcial). O crédito no instante $t \in (t_n,\ t_n+T_n)$ (i.e., nos instantes estritamente entre os cortes planejados) é dado pela fórmula:

$$C(t) = p(t)\Big\{ \big[\dot{f}(t-t_n) - (\rho + \pi\phi)\cdot f(t-t_n)\big] \\ - \sum_{m=1}^{n-1} \delta_m^s \lambda_m f(T_m)(1-\delta_m^p)\gamma_m e^{-\gamma_m(t-t_m-T_m)} \Big\} \qquad (46)$$

Nessa fórmula, o crédito *C(t)* envolve somente mudanças físicas ocorrendo no instante *t,* avaliadas a preço corrente *p(t)* conforme determinado pelo preço corrente das permissões de emissão.

Com base nesse modelo, os autores sugerem a seguinte política para distribuição de créditos de carbono para atividades florestais:

1. Imputar um crédito de $p(t) \cdot \dot{f}(t - t_n)$ sobre o valor do carbono fixado pelo crescimento real da floresta nas datas *t* estritamente entre cortes planejados, nas quais a idade da floresta é t-t_n.

2. Imputar um débito de $p(t) \cdot f(t - t_n)$ nas datas *t* em que ocorrer destruição total e um débito de $\phi p(t) \cdot f(t - t_n)$ quando houver destruição parcial.

3. Imputar um débito pelo valor do decaimento corrente dos produtos florestais no valor de $\delta_m^s \cdot f(T_m) \cdot \lambda_m (1 - \delta_m^p) \cdot \gamma_m \cdot p(t) \cdot e^{-\gamma_m (t - t_m - T_m)}$, em todas as datas, para cada corte passado $m<n$.

4. Imputar um débito discreto pelo valor da perda, $(1 - \lambda_n)(1 - \delta_n^p) \cdot f(T_n) \cdot p(t_n + T_n)$, no momento do corte das árvores.

5. Não imputar nenhum crédito ou débito para culturas futuras, $m>n$, pois essas não são avaliadas até que sejam realmente plantadas.

Essa política consiste, portanto, em creditar o crescimento corrente da floresta ignorando os riscos de incêndio e pragas (item 1) e cobrar pelas perdas devidas a fogo ou pestes no momento em que elas ocorrerem (item 2). Uma conseqüência benéfica dessa política é que haverá incentivo para que sejam tomadas ações de prevenção contra incêndios e pestes. Por outro lado, não há fluxo de receitas sobre o qual a taxa devida a fogo e a pragas possa ser cobrada da mesma maneira que o débito imputado pelas perdas em $t_n + T_n$ (item 2). Sendo assim, o país ou a firma que fosse responsável por essa cobrança perderia o valor das amenidades ambientais e o provável valor da madeira que seria produzida. O fluxo de despesas discreto e súbito causado pela destruição total ou parcial poderia ocasionar dificuldades para o país/firma, levando-os ao mercado de capitais ou de permissões para cobrirem os custos dessa súbita liberação de carbono. No caso de esses países/firmas serem avessos ao risco, o risco de incorrerem em tais custos poderia reduzir os incentivos para que investissem em projetos de seqüestro de carbono.

Contudo, observam os autores, não havendo correlação entre incêndios e ataques de pragas, o mercado de seguros poderia desenvolver ferramentas que ajudassem a cobrir esses riscos. Além do mais, o fato de as emissões de carbono se dispersarem uniformemente na atmosfera implicaria um preço de permissões de emissão *p(t)* também uniforme em nível mundial. Havendo um preço internacional, poderia também haver um mercado internacional para esse tipo de seguro, aumentando a competição e, portanto, a eficiência desse mercado.