



Flavio Daniel Baran

**Avaliação de uma Floresta de Eucaliptos na
Presença de um Mercado de Certificados para
Reduções de Emissões de Carbono: Uma
Abordagem por Opções Reais**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção do Departamento
de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: José Paulo Teixeira

Rio de Janeiro
Março de 2005



Flavio Daniel Baran

**Avaliação de uma Floresta de Eucaliptos na
Presença de um Mercado de Certificados para
Reduções de Emissões de Carbono: Uma
Abordagem por Opções Reais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção do Departamento
de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela
comissão examinadora abaixo assinada.

Prof. José Paulo Teixeira

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Carlos Patrício Samanez

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Tara Keshar Nanda Baidya

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pesquisa e Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de março de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Flavio Daniel Baran

Graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Trabalhou na Ecole d'Ingénieurs de Bienne, na Suíça, e, de volta ao Brasil, na Alcatel Telecomunicações. No mestrado, foi agraciado com bolsa de desempenho acadêmico da PUC-Rio.

Ficha catalográfica

Baran, Flavio Daniel

Avaliação de uma floresta de eucaliptos na presença de um mercado de certificados para reduções de emissões de carbono : uma abordagem por opções reais / Flavio Daniel Baran ; orientador: José Paulo Teixeira. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Industrial, 2005.

112 f. : il. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Industrial - Teses. 2. Opções reais. 3. Créditos de carbono. 4. Análise de investimentos. 5. Finanças corporativas. I. Teixeira, José Paulo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Para meus avós.

Agradecimentos

A meus pais, por tudo.

Ao Renato, à Cecília e à Deise, pelo apoio, atenção e carinho.

Ao professor José Paulo Teixeira, pela amizade e orientação.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus colegas do mestrado da PUC-Rio, em especial a Luciana, Fábio, André, Samir, Rodrigo e Suzana, pelo companheirismo ao longo do curso.

Aos professores do departamento, em especial aos professores Tara Baidya, Carlos Patrício Samanez e Leonardo Lima.

Ao professor Pierre Lasserre, da Universidade de Quebec em Montreal (UQAM), que tão prontamente se dispôs a esclarecer alguns pontos de seu artigo.

Aos funcionários do departamento, sempre dispostos a ajudar.

A todos os amigos e familiares que, de uma forma ou de outra, me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Baran, Flavio Daniel. **Avaliação de uma Floresta de Eucaliptos na Presença de um Mercado de Certificados para Reduções de Emissões de Carbono: Uma Abordagem por Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2005. 112p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A existência de um mercado para reduções de emissões de gases de efeito estufa cria uma nova variável a ser considerada na avaliação econômica de empreendimentos florestais: a absorção de CO₂. O seqüestro desse gás gera um fluxo de dividendos que se transforma em uma fonte adicional de receita, influenciando as decisões gerenciais tomadas pelo administrador florestal. O presente trabalho estuda como se dá essa influência sobre o melhor momento de se efetuar o corte das árvores. O empreendimento florestal estudado é uma floresta de eucaliptos, explorada em função de sua madeira e cuja função de crescimento é conhecida. O preço pelo qual pode ser vendida a madeira varia estocasticamente, não podendo ser previsto, enquanto que um certificado correspondendo a uma tonelada de CO₂ removido é negociado em um mercado próprio a um preço que é considerado como sendo constante e exógeno. Todos os outros parâmetros envolvidos são constantes e conhecidos. Diante do preço de mercado, incerto, o administrador pode tomar três decisões: derrubar a floresta, esperar ou abandonar o negócio. Devido às características desse tipo de empreendimento, a Teoria de Opções Reais mostrou-se a metodologia mais adequada a ser usada.

Palavras-chave

Opções reais; créditos de carbono; mercado de carbono; análise de investimentos; finanças corporativas.

Abstract

Baran, Flavio Daniel. **Valuation of an Eucalyptus Stand Under the Existence of a Market for Certified Carbon Emission Reductions: A Real Options Approach**. Rio de Janeiro, 2005. 112p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The existence of a market for certified greenhouse gases emission reductions creates a new variable to take into account in economical valuation of forest enterprises: the CO₂ absorption. The sequestration of this gas generates a dividend flow which becomes an extra revenue, having influence in the managerial decisions taken by the forest' manager. This work studies the effects caused by this influence over the optimal rotation age of the stand. The forest studied is an Eucalyptus stand, explored due to its timber and whose growth curve is known. The stumpage price varies stochastically and cannot be predicted, while a certificate corresponding to one ton of sequestered CO₂ is traded in a specific market at a price considered constant and exogenous. All the other parameters involved are constant and know. Facing the uncertain stumpage market price, the manager can make three possible decisions: to harvest, wait or abandon. Due to the characteristics of this kind of activity, the Real Options Theory has shown to be the most suitable to be used in this case.

Keywords

Real options; carbon credits; carbon market; investment analysis; corporate finance.

Aquele que não aumenta os seus conhecimentos os diminui.

Hillel

Sumário

1 Introdução	16
1.1. Objetivos	16
1.2. Considerações Iniciais	17
1.3. O Protocolo de Quioto	19
1.3.1. Comércio de Emissões	20
1.3.2. Comércio Internacional de Emissões (CIE)	21
1.3.3. Implementação Conjunta (IC)	21
1.3.4. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)	22
1.3.5. Atividades de Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas	23
1.4. Antecipação de Alguns Resultados	25
1.5. Relevância para o País	26
2 Base Teórica	28
2.1. Processos Estocásticos	28
2.1.1. Propriedade e Processo de Markov	29
2.1.2. Processo de Wiener ou Movimento Aritmético Browniano (MAB)	29
2.1.3. Processo de Wiener Generalizado ou Movimento Browniano com <i>Drift</i>	30
2.1.4. Movimento Browniano Generalizado ou Processo de Itô	31
2.1.5. Movimento Geométrico Browniano (MGB)	31
2.1.6. Processo de Reversão à Média ou de Ornstein-Uhlenbeck	32
2.1.7. Lema de Itô	33
2.2. Métodos Numéricos de Avaliação de Ativos	34
2.2.1. Modelo Binomial	34
2.2.2. Método das Diferenças Finitas	35
2.2.3. Simulação de Monte Carlo (SMC)	40
2.3. Técnicas de Otimização Dinâmica sob Incerteza	42
2.3.1. Programação Dinâmica	42

2.3.2. Direitos Contingenciais (<i>Contingent Claims Analysis</i>)	44
3 Opções Reais	47
3.1. A Abordagem Tradicional – Método do Valor Presente Líquido	47
3.2. A Abordagem de Opções Reais	49
3.3. Tipos de Opções Reais	51
3.3.1. Opção de Adiar o Investimento	51
3.3.2. Opção de Expandir	52
3.3.3. Opção de Contrair	52
3.3.4. Opção de Suspender Temporariamente	53
3.3.5. Opção de Abandono ou Troca de Uso	53
4 Discussão de Trabalhos Anteriores	54
4.1. Modelos de Determinação da Idade Ótima de Corte e Valor da Terra	54
4.2. Efeito Estufa e Créditos de Carbono	61
5 Modelo e Resultados	71
5.1. Modelos Florestais	71
5.2. Modelo Teórico	73
5.3. Resolução	78
5.4. Parâmetros	82
5.5. Resultados	84
6 Conclusões e Recomendações	96
6.1. Conclusões	96
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	98
7 Referências bibliográficas	99
Apêndice A: Condição de Primeira Ordem para a Rotação Ótima no Modelo de Ariste-Lasserre	106

Apêndice B: Condição de Primeira Ordem para a Rotação Ótima no Modelo de Faustmann a Partir do Modelo de Ariste-Lasserre	108
Apêndice C: Maximização do Valor Esperado da Terra	110
Apêndice D: Países Anexo I e Países Anexo B	112

Lista de figuras

Figura 1: Concentração de CO ₂ medida em Mauna Loa (Havaí) desde 1958	18
Figura 2: Árvore binomial de três passos	34
Figura 3: Representação gráfica do <i>grid</i> do método das diferenças finitas	36
Figura 4: Evolução da carteira ϕ para dois possíveis cenários	45
Figura 5: Crescimento e corte no modelo determinístico de Faustmann	54
Figura 6: Árvore binomial com 1 passo	74
Figura 7: Relação entre o preço da madeira e a idade de corte	84
Figura 8: Relação entre P e a idade de corte para vários valores de Z e $\lambda=1$ (modelo A-L)	86
Figura 9: Relação entre P e a idade de corte para vários valores de Z e $\lambda=0$ (modelo A-L)	87
Figura 10: Relação entre λ e a idade de corte para vários valores de Z e $P=15$	88
Figura 11: Relação entre λ e a idade de corte para vários valores de Z e $P=40$	88
Figura 12: Relação entre λ e a idade de corte para vários valores de Z e $P=100$	89
Figura 13: Relação entre λ e a idade de corte para vários valores de P e $Z=1$	90
Figura 14: Relação entre λ e a idade de corte para vários valores de P e $Z=3$	90
Figura 15: Relação entre λ e a idade de corte para vários valores de P e $Z=5$	91

Lista de tabelas

Tabela 1: Analogia entre uma opção financeira e uma opção de investir em um projeto	49
Tabela 2: Custo de manutenção ao longo da rotação	82
Tabela 3: Valor da floresta e idade de corte de acordo com P para o modelo de Faustmann	91
Tabela 4: Valor da floresta e idade de corte de acordo com P para $\lambda=1$ e $Z=1$ para o modelo A-L	92
Tabela 5: Valor da floresta e idade de corte de acordo com P para $\lambda=0$ e $Z=1$ para o modelo A-L	93
Tabela 6: Valor da floresta e idade de corte com $P=\$400$ para os modelos de Faustmann e Ariste-Lasserre com $Z=1$	94
Tabela 7: Preço-limite para diferentes custos de regeneração	95

Lista de abreviaturas e siglas

AAU	Assigned Amount Unit
A-L	Modelo de Ariste-Lasserre
BM&F	Bolsa de Mercadorias & Futuros
BVRJ	Bolsa de Valores do Rio de Janeiro
CBOE	Chicago Board Options Exchange
CCX	Chicago Climate Exchange
CDIAC	Carbon Dioxide Information Analysis Center
CER	Certificado de Emissões Reduzidas
CFC	Clorofluorcarboneto
CH ₄	Metano
CIE	Comércio Internacional de Emissões
CIMGC	Comissão Interministerial de Mudança Global no Clima
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de carbono
COP/MOP	Conference of the Parties/Meeting of the Parties
EDP	Equação diferencial parcial
EUA	Estados Unidos da América
FGV	Fundação Getúlio Vargas
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
GEE	Gases de efeito estufa
ha	Hectare
HFC	Hidrofluorcarbono
IC	Implementação conjunta
ICA	Incremento corrente anual
IMA	Incremento médio anual
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LSM	Least-Square Monte Carlo
LULUCF	Land-Use, Land-Use Change and Forestry
m ³ /ha	Metro cúbico por hectare
MAB	Movimento aritmético browniano
MBRE	Mercado Brasileiro de Reduções de Emissões
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MDL	Mecanismo de desenvolvimento limpo
MGB	Movimento geométrico browniano
N ₂ O	Óxido nitroso
NYBOT	New York Board of Trade
ONU	Organização das Nações Unidas
PFC	Perfluorcarbono
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio-Ambiente
ppmv	Partes por milhão por volume
REO	Rotação economicamente ótima
RVO	Rotação volumetricamente ótima

SF ₆	Hexafluoreto de enxôfre
SMC	Simulação de Monte Carlo
TIR	Taxa interna de retorno
ton/m ³	Tonelada por metro cúbico
TOR	Teoria das Opções Reais
UER	Unidade de Emissão Reduzida
UNFCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US\$	Dólar americano
VET	Valor esperado da terra
VP	Valor presente
VPL	Valor presente líquido
VPL _E	Valor presente líquido expandido
VPL _S	Valor presente líquido estático
WMO	World Meteorological Organization
µm	Micrometro