

RODRIGO FIRMINO DA SILVA

**PROJEÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO E ANÁLISE DA GERAÇÃO DE
CRÉDITOS EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586p
2007

Silva, Rodrigo Firmino da, 1979-

Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto / Rodrigo Firmino da Silva. – Viçosa, MG, 2007.

x, 53f. : il. ; 29cm.

Orientador: Carlos Pedro Boechat Soares.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 50-53.

1. Biomassa florestal. 2. Seqüestro de carbono.
3. Carbono - Aspectos econômicos. 4. Modelos matemáticos. 5. Eucalipto - Populações. I. Universidade Federal de Viçosa. II.Título.

CDD 22.ed. 634.989

RODRIGO FIRMINO DA SILVA

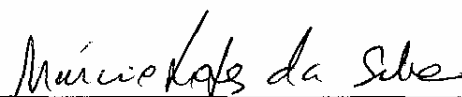
**PROJEÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO E ANÁLISE DA GERAÇÃO DE
CRÉDITOS EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 7 de fevereiro de 2007.



Prof. Laércio Antônio G. Jacovine
(Co-Orientador)




Prof. Márcio Lopes da Silva
(Co-Orientador)



Prof. Gilson Fernandes da Silva



Prof. Helio Garcia Leite



Prof. Carlos Pedro Boechat Soares
(Orientador)

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Vanderlei e Maria Izabel.

À minha noiva, Heloisa.

Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do curso de Engenharia Florestal.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

Ao professor Carlos Pedro Boechat Soares, pela amizade, pela atenção, pelos ensinamentos e pela orientação.

Aos professores Márcio Lopes da Silva, Laércio Antônio Gonçalves Jacovine e Helio Garcia Leite, pelos ensinamentos e conselhos.

Ao professor Gilson Fernandes da Silva, pela participação e pelas sugestões.

Aos meus pais, Vanderlei e Maria Izabel, pela educação, pelo apoio e pelo incentivo para a realização deste curso e para minha formação.

À minha irmã, Rosianny, pelo carinho e apoio.

À minha noiva, engenheira-agrônoma Heloisa Linhales, pelo companheirismo, carinho, apoio e incentivo.

Aos amigos de república, engenheiros florestais Henrique Quero Polli, Kelly Cristina Tonello, Dalton Longue Júnior, Felipe Ferreira Pereira, Marco Antonio Monte e Ivan da Costa Ilhéu Fontan; ao economista Norberto Vieira Martins; e ao engenheiro eletricitista Tiago Zanotelli, pelo apoio, pela amizade e pelo companheirismo.

Aos amigos de pós-graduação, engenheiros florestais Christian Rodello, Raul Demolinari, Marcos Vinicius Fernandes, Ricardo Gaspar, Aline Boina, Marcio Leles Romarco, Pablo Falco, Eric Gorgens e Rodrigo Castro, pela ajuda e amizade.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, em especial ao Chiquinho e à Rose, pelo apoio e pela amizade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

RODRIGO FIRMINO DA SILVA, filho de Vanderlei Firmino da Silva e Maria Izabel Garozi da Silva, nasceu na cidade de Colatina, Estado do Espírito Santo, em 3 de março de 1979.

Em 1996, concluiu o 2º grau na Escola de 1º e 2º Graus Rubens Rangel, na cidade de Colatina, Espírito Santo.

Em 1995, ingressou no Curso Técnico em Edificações do Centro Federal de Educação Tecnológica, em Colatina, Espírito Santo, formando-se técnico em dezembro de 1999.

Em 2000, ingressou no Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, graduando-se em dezembro de 2004.

Em março de 2005, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em 7 de fevereiro de 2007.

Em outubro de 2006, passou a exercer a função de Assistente Técnico na Plantar S.A. – Reflorestamentos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. Seqüestro e fixação de carbono pelas florestas	5
3.1.1. Estimativas da fixação de carbono pelas florestas	7
3.1.2. Mercado do carbono	10
3.2. Metodologias para quantificação da biomassa florestal.....	13
3.2.1. Métodos diretos.....	13
3.2.2. Métodos indiretos.....	14
3.3. Conversão da biomassa em carbono	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1. Descrição da área de estudo.....	17
4.2. Dados.....	17
4.3. Modelo volumétrico	18
4.4. Classificação da capacidade produtiva.....	19
4.5. Modelo de crescimento e produção.....	20
4.6. Determinação da idade técnica de colheita	21
4.7. Conversão de carbono para CO ₂ equivalente.....	22
4.8. Cenários avaliados.....	22
4.9. Análise econômica	23
4.10. Custos e receitas.....	26
4.11. Análise de sensibilidade	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1. Equações de volume com casca e carbono no fuste.....	30
5.2. Classificação da capacidade produtiva.....	30
5.3. Predição do estoque volumétrico e do estoque de carbono	32
5.4. Idades técnicas de colheita	33
5.5. Análise econômica	40
5.5.1. Determinação da rotação econômica	40
5.5.2. Análise de viabilidade econômica.....	41
5.5.3. Análise de sensibilidade	42
6. CONCLUSÕES.....	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

RESUMO

SILVA, Rodrigo Firmino da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2007. **Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto.** Orientador: Carlos Pedro Boechat Soares. Co-Orientadores: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine e Márcio Lopes da Silva.

O presente estudo teve como objetivos prever a produção volumétrica e o estoque de carbono nos fustes das árvores em povoamentos de eucalipto, por meio do ajuste de modelos de crescimento e produção, e avaliar economicamente a inclusão dos créditos de carbono nos projetos florestais, mediante o uso de critérios quantitativos. Para isso, utilizaram-se dados de povoamentos de *Eucalyptus grandis* localizados no município de Guanhães – Minas Gerais. De posse das equações de volume e carbono para o fuste das árvores individuais e de 95 parcelas permanentes, ajustou-se o modelo de crescimento e produção de Clutter (1963) para projeção da produção volumétrica e do estoque de carbono. A classificação da capacidade produtiva foi obtida por meio dos índices de local, pelo método da curva-guia. A determinação das idades técnicas de colheita (ITC), considerando três classes de produtividade e os estoques volumétrico e de carbono por hectare, foi feita com base nos máximos incrementos médios anuais (IMA). A avaliação econômica e a determinação da rotação econômica foram realizadas, utilizando critérios quantitativos: valor anual

equivalente, valor presente líquido, taxa interna de retorno, razão benefício/custo e valor esperado da terra e uma taxa de desconto de 10% ao ano. Após as análises, verificou-se que: o modelo de crescimento e produção proposto por Clutter (1963) foi adequado para prever a produção futura volumétrica e do estoque de carbono, mantendo a coerência entre as idades técnicas de colheita e as capacidades produtivas; as idades técnicas de colheita (ITCs) foram praticamente iguais para o estoque volumétrico e para o estoque de carbono; há relação direta, na ordem de 86,15%, entre a produção de madeira, em m³/ha, e o estoque de carbono, em tonelada de CO₂/ha; os certificados de emissões reduzidas (CERs) contribuem positivamente para a viabilidade econômica de projetos florestais em locais de baixa produtividade; e, na análise de sensibilidade, a variação do preço da madeira foi o item que mais afetou a viabilidade econômica dos projetos. Por outro lado, os CERs influenciaram muito pouco.

ABSTRACT

SILVA, Rodrigo Firmino da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February of 2007. **Carbon stock projection and credit generation analysis in Eucalypt stands.** Adviser: Carlos Pedro Boechat Soares. Co-Advisers: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine and Márcio Lopes da Silva.

The objective of this study was to predict the volumetric production and carbon stock in tree stems in Eucalypt stands, by adjusting the growth and production models as well as to economically evaluate the inclusion of carbon credits in forest projects by using quantitative criteria. Thus, data from *Eucalyptus grandis* stands, located in Guanhães-Minas Gerais, were used. Based on the volume and carbon equations for the stems of individual trees and for 95 permanent plots, the Clutter growth and production model (1963) was adjusted for volumetric production and carbon stock projection. Productive capacity classification was obtained by means of the local indexes, by the guide-curve method. Determination of the technical age of cutting (ITC's), considering three productivity classes and volumetric and carbon stocks per hectare, was carried out based on mean maximum annual increments (MAI). Economic evaluation and economic rotation determination were carried out using quantitative criteria: equivalent annual value, present net value, internal return rate, benefit/cost ratio, and expected land values and a discount rate of 10% per year. After the analyses, it was verified that : the growth and production model proposed by Clutter (1963) was adequate

to predict future volumetric production and carbon stock, maintaining coherence between harvesting technical ages and yield capacities; technical ages of cutting (ITC's) were practically the same for volumetric production and carbon stock; there is a direct relation, in the order of 86.15%, between wood production in m³/ha, and carbon stock in ton of CO₂/ha; the Reduced Emission Certificate (CER's) contribute positively for the economic viability of forest projects in places with low productivity ; and, the sensitivity analysis showed that wood price variation was that most affected the economic viability of the projects, in contrast with the RECs, which had little influence.

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1980, questões relativas às mudanças climáticas, ao aquecimento global e ao efeito estufa passaram a ser destaques como ameaças ambientais que colocam em risco a integridade do Planeta. Essas questões ganharam importância mundial, culminando na criação da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas Globais (UNFCCC – *The United Nations Framework Convention Climate Change*), em 1992.

As mudanças climáticas são causadas pelo agravamento do efeito estufa, consequência do aumento da concentração de certos gases na atmosfera terrestre, como o gás carbônico (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). A principal fonte desses gases é a queima de combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão mineral. As atividades agrícolas, o desmatamento, as queimadas e a pecuária também contribuem para o agravamento desta situação (INFORMMA, 2005).

Estudos têm mostrado que a concentração de dióxido de carbono (CO₂) e a temperatura da atmosfera variaram conjuntamente nas últimas dezenas de milhares de anos, reforçando a preocupação de que o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera pode provocar mudanças climáticas, como alteração dos ciclos hidrológicos, intensificando e alterando a frequência de eventos extremos (tornados, furacões, enchentes etc.) (CAMPOS, 2001).

As primeiras negociações internacionais referentes às mudanças climáticas ocorreram na ECO-92, no Rio de Janeiro, em 1992, resultando na criação da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, também chamada de Convenção do Clima, da qual o Brasil foi o primeiro signatário. Desde então, foram realizadas várias Conferências das Partes (COPs) para dar continuidade às discussões sobre o tema (INFORMMA, 2005).

Desde o início das discussões, o uso da terra e das florestas era contemplado como mecanismo para mitigar as mudanças climáticas. Em 1997, na COP-3, foi criado o Protocolo de Quioto, como um primeiro passo concreto nessa direção. Porém, nessa fase, a polêmica girava em torno das incertezas científicas em como medir as emissões dessas atividades e nas dificuldades para um acompanhamento das taxas de desmatamento. A partir do estabelecimento dos mecanismos de flexibilização, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), o foco da discussão voltou-se para o seqüestro de carbono pelas florestas como uma das alternativas de compensação das emissões dos países industrializados (YU, 2002).

No caso das florestas, o desmatamento e as queimadas contribuem para agravar o efeito estufa, uma vez que liberam o CO₂ para a atmosfera. Mas, quando se conserva, preserva, recupera ou plantam-se florestas, ocorre o processo inverso, devido ao surgimento de um sumidouro de carbono, uma vez que as florestas removem parte do CO₂ da atmosfera através do processo de fotossíntese, promovendo o chamado “seqüestro de carbono”.

Atuando dessa maneira, as florestas podem contribuir para a estabilidade ambiental, interferindo em elementos climáticos, no ciclo hidrológico, além de prevenir a erosão e a deterioração do solo.

A possibilidade de países contabilizarem o seqüestro de carbono pelas florestas nos seus inventários nacionais de emissões criou uma perspectiva para o setor florestal. No entanto, observa-se a necessidade de estudos de mensuração florestal e de viabilidade econômica de projetos, visando o desenvolvimento de técnicas e métodos para a quantificação do estoque de carbono presente na biomassa florestal. Com estudos dessa natureza, o setor florestal pode se destacar no mercado de créditos de

carbono, já que as florestas, principalmente as plantadas, terão ainda mais valor agregado aos seus recursos.

Nesse contexto, o Brasil poderá se beneficiar e assumir posição privilegiada junto aos países que buscam reverter o processo de mudança climática, tanto do ponto de vista de reduções das emissões como em projetos de seqüestro de carbono, uma vez que possui potencialidades e tecnologias que o diferem dos demais países (ROCHA, 2002).

Portanto, esse novo mercado tem o potencial de gerar um fluxo de capital para as atividades florestais brasileiras, em que o setor florestal oferece oportunidades inigualáveis de compensação de carbono por meio do MDL. No entanto, a natureza e a magnitude dessas oportunidades dependerão de como será interpretado e de como serão contabilizados os “créditos de carbono”.

2. OBJETIVOS

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivos:

- Predizer a produção volumétrica e o estoque de carbono nos fustes das árvores em povoamentos de eucalipto, por meio do ajuste de modelos de crescimento e produção.
- Avaliar economicamente a inclusão dos créditos de carbono nos projetos florestais, mediante o uso de critérios quantitativos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Seqüestro e fixação de carbono pelas florestas

O conceito de seqüestro de carbono foi aprovado na Conferência de Quioto, em 1997, com os objetivos de conter e reverter o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera para reduzir o efeito estufa. Em princípio, o seqüestro de carbono refere-se desde a preservação de áreas florestais com riscos de serem destruídas, à recuperação de florestas degradadas e ao estabelecimento de novas plantações florestais, até a sistemas agroflorestais com espécies nativas ou exóticas (YU, 2002).

O seqüestro de carbono por meio das atividades florestais é baseado em duas premissas. Primeiro, o gás carbônico é um gás atmosférico que circula no mundo todo, conseqüentemente os esforços para remoção dos gases do efeito estufa terão resultado igual, sejam eles aplicados próximo à fonte ou em locais distantes. Segundo, a vegetação verde tira o gás carbônico da atmosfera no processo de fotossíntese e o utiliza para fazer açúcares e outros compostos orgânicos usados no crescimento e metabolismo. As plantas lenhosas armazenam carbono em madeira e outros tecidos até a sua morte e decomposição, fase em que o carbono na madeira poderá ser desprendido na forma de gás carbônico, monóxido de carbono ou metano, ou poderá ficar incorporado ao solo como substância orgânica (COSTA *et al.*, 2000, citados por FERNANDES, 2003).

De acordo com Gardner e Mankin (1981), citados por Schumacher *et al.* (2002), os ecossistemas florestais contêm cerca de 90% da biomassa da Terra e cobrem aproximadamente 40% de sua superfície, o que ressalta a capacidade de fixação de CO₂ pelas florestas, quando comparadas a outras tipologias vegetais.

Segundo Leles *et al.* (1994), as florestas como fonte de captura ou de liberação de CO₂ são assuntos ainda muito discutido e polêmico. Enquanto alguns argumentam que as florestas liberam carbono, através dos desmatamentos e da queima e decomposição dos vegetais, outros enfatizam que os ecossistemas florestais são retentores de carbono, baseando-se nas rápidas taxas de sucessão e na alta retenção de CO₂ das florestas tropicais.

O seqüestro de carbono pode ser quantificado por meio da estimativa da biomassa da planta acima e abaixo do solo. Para se proceder à avaliação dos teores de carbono dos diferentes componentes da vegetação (parte aérea, raízes, camadas decompostas sobre o solo, entre outros) e, portanto, contribuir para estudos de balanço energético e do ciclo de carbono na atmosfera, é necessário, inicialmente, quantificar a biomassa vegetal de cada componente da vegetação (disponível em: <www.ambientebrasil.com.br>, acesso em: 2005).

A eficiência do uso de florestas nativas ou plantadas para seqüestrar e armazenar carbono, segundo Reis *et al.* (2001), deve levar em conta o estado atual de degradação da área, o manejo adotado, o tempo de permanência da floresta antes de ser explorada e a vida média dos produtos advindos da floresta explorada.

As florestas são consideradas importantes para o equilíbrio de carbono global, pois guardam dentro de suas árvores e no solo mais carbono do que o existente atualmente na atmosfera (HOUGHTON, 1994). Segundo o autor, se as florestas forem cortadas, a maior parte do carbono guardado nas árvores será liberado para a atmosfera rapidamente, através de queimadas, ou mais lentamente, por meio da decomposição. Cerca de 25% do carbono existente no metro superior do solo é também perdido na atmosfera se o solo for cultivado.

De acordo com Larcher (2000), na fotossíntese, a energia é absorvida e transformada em energia de ligações químicas. Para cada átomo-grama de carbono assimilado, obtém-se energia potencial equivalente a 477 kJ (144 kcal). A fotossíntese envolve processos fotoquímicos, que ocorrem na presença de luz; processos enzimáticos, que não requerem luz; e processos de difusão, que provocam troca de dióxido de carbono e oxigênio entre os cloroplastos e o ar exterior. Cada um desses subprocessos é influenciado por fatores internos e externos e pode limitar o rendimento do processo total.

Quando as árvores estão em fase de crescimento, elas removem quantidades significativas de carbono da atmosfera. Mas, à medida que seu crescimento diminui, elas praticamente não capturam mais CO₂, pois a taxa de respiração tende a se igualar à taxa fotossintética (LELES *et al.*, 1994).

Apesar de a atividade fotossintética ser limitada, em virtude da baixa concentração natural de CO₂, este processo é o principal removedor deste gás da atmosfera. Estima-se que, anualmente, os ecossistemas terrestres removam em torno de 2 bilhões de toneladas de carbono (2 Gt C) na forma de CO₂. Por isto, a vegetação é um fator estabilizador na circulação da matéria na biosfera e pode ser substancialmente influenciada pelas mudanças climáticas globais (MARTINEZ, 2001).

De acordo com Lugo e Brown (1980), citados por Leles *et al.* (1994), a fixação de carbono, durante cada ciclo de crescimento da plantação florestal, é representada pelo aumento em biomassa dos produtos madeireiros e não-madeireiros, os quais têm diferentes dinâmicas de crescimento. As florestas nativas também possuem importância na contribuição no processo de fixação de carbono, em virtude de manterem o carbono fixado por mais tempo, devido às intervenções silviculturais serem realizadas por períodos mais longos (WATZLAWICK *et al.*, 2002).

3.1.1. Estimativas da fixação de carbono pelas florestas

Watzlawick *et al.* (2002) ressaltaram que as estimativas do estoque de carbono devem ser obtidas em todos os estágios de desenvolvimento, bem como nas diferentes partes componentes de uma árvore e diferentes compartimentos do ecossistema florestal, já que diferentes tipos florestais,

em diferentes estágios, armazenam quantidades diferentes de carbono. Assim sendo, devem ser utilizadas metodologias adequadas para que todos os componentes sejam quantificados e incorporados nas estimativas do balanço geral de carbono fixado.

Segundo estimativas realizadas por pesquisadores do Experimento de Grande Escala da Biosfera – Atmosfera na Amazônia, na floresta Amazônica estão estocados cerca de 70 bilhões de toneladas de carbono, o que representa um valor bastante significativo (REZENDE, 2002).

Outros estudos que vêm sendo efetuados em diferentes pontos da floresta amazônica têm mostrado que ela absorve muito mais CO₂ do que emite, fato este que desafia os modelos teóricos. Segundo dados apurados pelas medições de campo realizadas no período de 2000 a 2001, a floresta Amazônica absorve cerca de 0,4 a 1 gigatonelada de carbono por ano da atmosfera (REZENDE, 2002).

Brown e Lugo (1984), ao estudarem seis tipologias florestais tropicais, encontraram valores de biomassa total entre 40 e 185 toneladas por hectare. Usando um fator de conversão de 0,5 para determinar a quantidade de carbono presente na constituição da biomassa total das florestas, chegaram a um valor de 228 x 10⁹ toneladas de carbono fixado.

Fearnside (1994) relatou sobre as controvérsias encontradas sobre as estimativas de biomassa das florestas nativas, principalmente na floresta Amazônica, como pode-se observar na Tabela 1. Essas controvérsias podem ser explicadas pelo fato de existirem diferentes tipologias florestais, em diferentes estágios de desenvolvimento, na floresta Amazônica.

Tabela 1 - Estimativas de biomassa encontradas para a floresta Amazônica

Biomassa (t/ha)	Fonte
352,0	Brown e Lugo (1982)
155,1	Brown e Lugo (1984)
362,0	Fearnside (1985)
254,0	Fearnside (1986, 1987)
169,7	Brown et al. (1989)

Fonte: adaptado de Fearnside (1994).

Alguns estudos científicos conduzidos no Brasil, na Indonésia e no Peru apresentaram estimativas de estoque de carbono que variam de 100 a 450 toneladas de carbono por hectare, indicando alta variabilidade do estoque de carbono em florestas nativas, em função das tipologias estudadas (KRUG, 2001).

Reis *et al.* (1994), para as florestas de eucalipto no Estado do Espírito Santo, determinaram um seqüestro total de carbono de 10,32 t/ha/ano, sendo 65% proveniente da biomassa do tronco, 13% da copa e 22% das raízes. Ainda segundo os autores pode-se acrescentar pelo menos 20% a essa estimativa, correspondente à produção média de matéria orgânica morta ao longo de uma rotação de sete anos, resultando em um potencial de seqüestro de carbono de 12,38 tC/ha/ano.

O Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) apresentou algumas estimativas sobre o carbono fixado pelas florestas plantadas dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, para o período de 1990 a 1994 (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2002).

Os resultados mostraram um saldo positivo de 40,7 e 3,04 milhões de toneladas de carbono fixado pelas florestas de eucalipto e pinus, respectivamente, nesse período. O mesmo estudo também mostrou que o tronco das árvores foi o componente que apresentou as maiores quantidades de carbono fixado, em torno de 65% para o eucalipto e 63% para pinus.

Paixão (2004), estudando a quantificação do estoque de carbono em um povoamento de eucalipto, verificou que o fuste é o componente da árvore que mais contribui para o total de carbono da parte aérea (81,84%), seguido por casca (8,05%), galhos (7,74%) e folhas (2,57%). Também constatou que a maior quantidade de carbono estocado, em toneladas por hectare, está na parte aérea (47,7 toneladas), seguida pelas raízes (14,71 toneladas) e pela manta orgânica (8,72 toneladas), totalizando 71,13 toneladas de carbono total por hectare, aos 6 anos de idade.

Tsukamoto Filho (2003), ao estudar a fixação de carbono em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, também concluiu que a maior quantidade de carbono fixado se encontra na parte aérea das árvores, correspondendo a 73,26%.

3.1.2. Mercado do carbono

O Protocolo de Quioto prevê a criação do primeiro mercado internacional oficial para o comércio de créditos de carbono, que são certificados outorgados às indústrias e às empresas que comprovadamente reduzam as emissões de gases causadores do efeito estufa.

O preço de cada crédito de carbono é definido de acordo com as características do projeto executado, ou seja, uma empresa que realiza reflorestamento em um local degradado por suas atividades capta créditos mais baratos do que aqueles provenientes da instalação de um equipamento de alta tecnologia para reduzir a emissão de gases poluentes. Já a imposição de tetos máximos para projetos de reflorestamento dentro do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) restringiu as possibilidades de captação de recursos para projetos que visem reflorestar áreas degradadas.

Mas, com a adoção dos procedimentos simplificados para projetos florestais no MDL, volta a possibilidade de atender a alguns projetos nesta modalidade por meio do próprio mercado de carbono oficial. Os projetos que prevêm apenas o plantio de florestas para fins econômicos ou mesmo de recuperação de áreas de preservação permanente ou reservas legais seriam de interesse menor para o mercado de carbono, mas podem representar uma opção para criação de parcerias entre empresas nacionais, comunidades e governo.

Segundo Gomes (2005), por enquanto o Banco Mundial é o grande comprador de créditos de carbono do mundo. A instituição prevê investir 1 bilhão de dólares até 2012, inclusive no Brasil, onde já foram comprados projetos de cinco empresas. Mas o Banco Mundial não é o único grande comprador. Nos últimos quatro anos, pelo menos 140 milhões de dólares em contratos futuros de créditos de carbono foram negociados no Brasil, por outros agentes.

Nesse mercado paralelo do carbono, os créditos são comprados por intermediários, que são investidores ou bancos. As transações desse mercado são feitas com base em normas emitidas por instituições financeiras, como a Bolsa de Chicago – *Chicago Climate Exchange (CCX)* –, que é uma bolsa auto-regulável criada em 2003 por um grupo de empresas

norte-americanas, para negociar a redução voluntária dos gases do efeito estufa.

De acordo com a consultoria norueguesa *Point Carbon*, pelo menos outras 60 companhias no Brasil já investem no negócio do carbono. Trata-se da maior concentração de projetos em implantação em um país em desenvolvimento. As consultorias especializadas notam um interesse crescente no mercado de carbono e prevêem um *boom* nos próximos dois anos, principalmente porque a venda de créditos de carbono é uma nova fonte de recursos para as empresas.

Sadia, Cargill e CST são algumas das grandes empresas que já iniciaram seus projetos para reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Espera-se que esse mercado renda, para o Brasil, pelo menos 450 milhões de dólares até 2012, fim da primeira fase do Protocolo de Quioto (GOMES, 2005).

No caso do setor florestal, destaca-se a empresa Plantar S.A., que foi uma das primeiras do País a fechar uma venda de créditos no mercado de carbono, em uma transação de 5,3 milhões de dólares com o Banco Mundial (GOMES, 2005). A empresa executa seu próprio projeto enquadrado como MDL, por meio do Fundo Protótipo do Carbono (PCF). O projeto é qualificado em parte como substituição energética e em parte como seqüestro de carbono florestal. Com isso, a empresa pretende retirar mais de 12 milhões de toneladas de CO₂ do ambiente, que serão negociados com países desenvolvidos que não conseguirem cumprir a meta de Quioto, de redução de emissões (YU, 2002).

Outro projeto em andamento é entre a Peugeot e a organização francesa *Office National de Forêt* (ONF), associada a uma ONG brasileira, a Pró-Natura, que executam o “Projeto de Reflorestamento para o seqüestro de carbono da Peugeot” nos municípios de Juruena e Cotriguaçu, no Estado do Mato Grosso. O investimento previsto é de US\$ 12 milhões, dos quais US\$ 6,5 milhões serão pleiteados junto ao Fundo Global para o Meio Ambiente. Estima-se seqüestrar 2 milhões de toneladas de carbono ao longo da duração de 40 anos do projeto. Caso isso aconteça, o custo por tonelada de carbono seqüestrado seria de US\$ 6,00 (YU, 2002).

Yu (2002) relatou também os projetos SPVS/TNC, que envolvem a ONG brasileira Sociedade de Proteção da Vida Selvagem (SPVS), sob a mediação da ONG americana *The Nature Conservancy* (TNC), a saber: 1) “Ação Contra aquecimento Global na Serra do Itaqui”, em Guaraqueçaba-PR; 2) “Projeto de Reflorestamento da Floresta Atlântica em Cachoeira”, em Guaraqueçaba - PR; e 3) “Projeto Piloto de Reflorestamento no Morro da Mina”, em Antonina - PR.

Segundo Tsukamoto Filho (2003), outros projetos para estudar a fixação de carbono em plantações florestais começaram a ser desenvolvidos. Um exemplo é o projeto executado pela *Cornell University* (USA) e pela Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), denominado “Estoque de carbono e de nutrientes e crescimento de florestas submetidas à exploração convencional e de baixo impacto em assentamentos, na região noroeste do Estado do Mato Grosso”. Outro exemplo é o projeto “Determinação de biomassa e conteúdo de carbono em seringais de três idades”, executado pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), em parceria com outras instituições internacionais de ensino e pesquisa.

Especialistas ambientais do Banco Mundial calculam que 1,6 bilhão de toneladas de carbono sejam compradas e vendidas no MDL. Paga-se, em média, US\$ 5,00 a tonelada de carbono, o que situa o tamanho do mercado em cerca de US\$ 8 bilhões. Mas a demanda pode superar a oferta. O total de créditos disponíveis corresponde a apenas 10% da exigência de redução de poluição até 2012. Por isso, o preço da tonelada de carbono pode chegar a US\$ 12,00.

Os dados sobre esse novo mercado ainda variam muito de uma fonte para outra, mas o Brasil é um dos três maiores vendedores de créditos de carbono do mundo. Segundo o relatório da organização não-governamental CDMWatch, os outros dois grandes são Índia e Chile, seguidos de perto pela China (GOMES, 2005).

O advento desse mercado é aguardado com muita expectativa por parte dos responsáveis pela política florestal brasileira, pois há muito tempo vêm sendo procurados meios de combater os principais problemas florestais deste País, como o desmatamento e os baixos valores dos produtos florestais, que por sinal são correlatos. Ambos precisam de mecanismos que

visem aumentar a viabilidade da atividade florestal e garantir a sua sustentabilidade, por meio da criação de novos produtos e mercados. Por isto, deposita-se tanta esperança nesse eminente mercado.

3.2. Metodologias para quantificação da biomassa florestal

Estudos sobre a quantificação do estoque de carbono passam, necessariamente, pela quantificação da biomassa florestal, que pode ser definida como a massa orgânica produzida por unidade de área, podendo ser expressa em termos de peso seco, peso úmido e peso em carbono (ODUM, 1986).

Para Sanquetta (2002), biomassa quer dizer massa de matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal. O termo biomassa florestal pode significar toda a biomassa existente na floresta, ou apenas a sua fração arbórea. Para o autor, o termo fitomassa também vem sendo empregado para especificar que se trata de biomassa de origem vegetal.

A biomassa presente em uma floresta pode ser quantificada ao somar à biomassa da parte aérea de cada árvore (tronco, folhas, flores e frutos) a biomassa presente na matéria viva ou morta sobre o solo (sub-bosque e manta orgânica) e sob estas (raízes), por meio de métodos diretos (destrutivos), ou por meio dos métodos indiretos (SALATI, 1994).

3.2.1. Métodos diretos

Também conhecido como método destrutivo, ele consiste na derrubada de árvores-amostra, com posterior corte da vegetação viva sobre o solo, retirada da matéria orgânica sobre o solo (serapilheira) e retirada do material sob o solo (raízes).

Conforme descrito por Salati (1994), essa metodologia, de forma simplificada, implica o corte de parte das árvores da floresta, medindo-se o volume e a massa dos indivíduos. Por meio de amostragens determina-se a umidade e estima-se a biomassa seca total. A matéria morta acima do solo é estimada por meio de amostragem em diversos locais. O sistema radicular é medido ao arrancar o material do solo por amostragens em áreas

determinadas. O material orgânico do solo é medido por meio de amostras do solo até certa profundidade, geralmente até 1 m.

Já para Sanquetta (2002), o caso mais simples em termos de procedimento de campo consiste apenas em cortar a planta e pesá-la integralmente (com ou sem raízes, dependendo do objetivo), sem qualquer preocupação com a separação das partes. Quando isso ocorre, o procedimento é dito ser uma “simples pesagem”. Às vezes, se o interesse reside única e exclusivamente na porção do caule, remove-se o caule e procede-se a pesagem. Mas se há o interesse em separar as diferentes frações da biomassa, então é necessário desmembrar caules, raízes, folhas, galhos, frutos e flores antes de realizar a pesagem.

3.2.2. Métodos indiretos

Os métodos indiretos são utilizados para estimar a biomassa de áreas florestais de grande extensão. Normalmente, são utilizadas relações empíricas (equações) que correlacionam a biomassa com variáveis, como *DAP*, altura e volume, para estimar a biomassa de árvores individuais, as quais são utilizadas para obter estimativas por hectare e para a floresta toda (SALATI, 1994).

O uso de modelos de regressão destaca-se entre os métodos indiretos de quantificação da biomassa florestal. Porém, outros métodos de quantificação indireta também vêm sendo testados e aplicados, por exemplo, o uso do sensoriamento remoto, que é uma técnica mais complexa, e o uso da modelagem do crescimento e da produção, principalmente em florestas plantadas.

Dentre as tecnologias de sensoriamento remoto, pode-se destacar o uso do *Lidar* (*Light Detection and Ranging*), que é uma técnica baseada em imagens que utiliza o laser como fonte de energia. Essa técnica consiste na medição do tempo de ida e volta da energia de um pulso laser (geralmente com o comprimento de onda no infravermelho próximo, em estudos de vegetação) entre o sensor e o alvo. Este pulso incidente de energia interage com a copa da árvore (folhas, galhos e tronco) e a superfície do solo, retornando-o ao instrumento, obtendo-se as alturas das árvores. Assim,

permite gerar estimativas da altura da vegetação da estrutura do dossel, do índice de área foliar, do volume e da biomassa sobre o solo (PIRES, 2005).

Com relação aos modelos de crescimento e produção, estes geralmente são ajustados para propiciar estimativas da produção volumétrica. Segundo Amaro e Tomé (1997), esses modelos podem ser classificados em empíricos e de processos.

Os modelos empíricos são desenvolvidos com base em dados de medições periódicas de árvores, feitas em parcelas permanentes, sendo caracterizados por descreverem as relações entre as variáveis envolvidas sem levar em consideração fatores biológicos e físicos do crescimento. Dentre esses modelos têm-se os modelos tipo povoamento total, os modelos de distribuição diamétrica e os modelos de árvores individuais.

Os modelos de processos ou mecanísticos são baseados em fatores biológicos e físicos que determinam o crescimento das árvores, logo são mais usados em pesquisas e pouco usados em manejo de florestas, por causa de sua complexidade e por não permitir fazer predição.

No Brasil, ainda são escassos os trabalhos de modelagem do crescimento e da produção que envolvem os estoques de biomassa e carbono, com destaque para Soares *et al.* (2005).

3.3. Conversão da biomassa em carbono

Higuchi e Carvalho Júnior (1994), estudando a fitomassa e o conteúdo de carbono de espécies arbóreas na Amazônia, encontraram valores do teor de carbono no tronco das árvores de, no mínimo, 46% e no máximo 53%, os quais estão bem próximos das estimativas apresentadas na literatura. Para outros compartimentos da floresta, como plântulas (indivíduos com até 50 cm de altura), mudas (indivíduos com altura maior que 50 cm e DAP < 5 cm) e galhos finos, os autores encontraram valores de teores de carbono iguais a 46,5, 49,3 e 46,8%, respectivamente.

No estudo apresentado por Soares e Oliveira (2002), sobre equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto, as estimativas da quantidade de carbono presentes no fuste (com ou sem casca), nos galhos e nas folhas das árvores-amostra foram obtidas

ao multiplicar as respectivas estimativas da biomassa pelo fator 0,5, ou seja, considerou-se que, em média, a biomassa é composta por 50% de carbono.

O teor de carbono também pode ser obtido por meio de análises químicas. Segundo a literatura, o teor de carbono elementar, presente na constituição da matéria seca (biomassa) de diferentes partes da árvore, está em torno de 50%, isto é, para cada tonelada de matéria seca, cerca de 0,5 tonelada é de carbono. Em vários trabalhos desenvolvidos no Estado de Minas Gerais foram encontrados teores médios de carbono para tronco, galhos, folhas e raízes de árvores de *Eucalyptus* de 46,8, 47,7, 50,5 e 46,4%, respectivamente (PAIXÃO, 2004).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição da área de estudo

O presente estudo foi realizado com dados de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, plantados no espaçamento 3 x 2 m, com idades variando de 32 a 80 meses, localizados no município de Guanhães - MG.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima predominante na região é o AW – clima tropical chuvoso, com inverno seco e chuvas máximas no verão. Na região, a temperatura média anual é de 21,7 °C, a umidade relativa do ar gira em torno de 73,9% e a precipitação média anual é de 1.183 mm. Os solos da região são classificados como de textura argilo-arenosa.

4.2. Dados

Foram utilizadas 532 árvores, distribuídas em diferentes classes de diâmetros e alturas (Tabela 2), para o ajuste das equações de volume e de carbono para os fustes das árvores individuais. Em cada árvore-amostra foram medidos o *DAP* (diâmetro com casca a 1,30 m do solo) e a altura total (*Ht*), bem como foi realizado o procedimento de cubagem rigorosa para obtenção do volume do fuste com e sem casca. Além disso, foram retirados discos de madeira e casca para determinação das densidades básicas da

Tabela 2 – Número de árvores-amostra por classe de diâmetro e altura

	Classe de Altura (m)															Total		
	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44		46	48
8	3	1																4
10	7	30	32	10	1													80
12		1	2	15	22	9												49
14			4	15	17	6	2											44
16				9	20	21	17	6	2									75
18				3	8	21	17	7	7	3	2							68
20				1	3	7	9	8	5									33
22					4	11	16	15	9	3	5	1	1					65
24					1		4	14	9	4	6	4						42
26						1		7	5	1	1	1	1					17
28							1	2	3	6	5	1	3	1				22
30							1	3	1	2		1	3	1	2			14
32												1	1					2
34												1	1	4	4	1		11
36														1	1	1	1	4
38															1		1	2
Total	10	32	38	53	76	76	67	62	41	19	19	10	10	7	8	2	2	532

madeira e da casca (VITAL, 1985), que multiplicados pelos respectivos volumes forneceram as estimativas de biomassa de madeira e da casca do fuste.

Para obter as estimativas de carbono estocado nos fustes das árvores-amostra (madeira + casca), as estimativas de biomassa foram multiplicadas por um fator igual a 0,5, ou seja, foi assumido que 50% da biomassa era composta por carbono, como sugerido por Higuchi e Carvalho Júnior (1994) e Soares e Oliveira (2002).

Embora existam outros componentes nas árvores (raízes, galhos, folhas, flores e frutos) que estocam carbono, os créditos de carbono foram contabilizados levando em consideração apenas o carbono fixado nos fustes das árvores de eucalipto, por ser a parte da árvore que mais fixa carbono e que possui dados disponíveis nos inventários florestais.

4.3. Modelo volumétrico

De posse das informações de *DAP* e *Ht*, do volume com e sem casca e do carbono no fuste de cada árvore-amostra, foram ajustadas equações referentes ao modelo de Schumacher & Hall (1933), cuja relação funcional é

dada por:

$$Y = b_0 \cdot DAP^{b_1} \cdot Ht^{b_2} \cdot e \quad (1)$$

em que

Y = volume total com casca, em m³; ou carbono total no fuste (madeira+casca), em kg;

DAP = diâmetro com casca medido a 1,30 m do solo, em cm;

Ht = altura total da árvore, em metros;

b_0, \dots, b_2 = parâmetros do modelo; e

e = erro aleatório.

Para avaliar a precisão das equações ajustadas foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2), o erro-padrão da estimativa ($S_{y.x}$) e o coeficiente de variação (CV%). A exatidão das estimativas foi avaliada por meio da análise gráfica dos resíduos (erros) percentuais (R%), obtidos por:

$$R(\%) = \frac{Y_{est.} - Y_{obs.}}{Y_{obs.}} \cdot 100 \quad (2)$$

em que

$Y_{est.}$ = volume estimado, com casca, em m³; ou carbono total no fuste estimado (madeira+casca), em kg; e

$Y_{obs.}$ = volume observado, com casca, em m³; ou carbono total no fuste observado (madeira+casca), em kg.

4.4. Classificação da capacidade produtiva

A classificação da capacidade produtiva dos povoamentos foi realizada por meio dos índices de locais, utilizando o método da curva-guia. Para isso, ajustou-se a equação referente ao seguinte modelo:

$$\ln Hd = b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{1}{I} \right) + e \quad I_i = 60 \text{ meses} \quad (3)$$

em que

Hd = altura dominante, em metros;

I = idade, em meses;

I_i = idade índice, em meses;

b_0, b_1 = parâmetros do modelo;

Ln = logaritmo neperiano; e

e = erro aleatório.

Com base no feixe de curvas geradas a partir da curva-guia, foram consideradas três classes de produtividade (alta, média e baixa).

4.5. Modelo de crescimento e produção

As equações que estimam o volume e o carbono das árvores individuais foram utilizadas para totalizar 95 parcelas permanentes medidas entre 1996 e 2000. As estimativas das parcelas foram, então, utilizadas no ajuste das equações referentes ao modelo de crescimento e produção de Clutter (1963), pelo Método dos Mínimos Quadrados em Dois Estágios, o qual é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} LnY_2 = b_0 + \frac{b_1}{I_2} + b_2S_1 + b_3LnB_2 + e \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} LnB_2 = LnB_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + b_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + b_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S_1 + e \end{array} \right. \quad (5)$$

em que

Y_2 = produção volumétrica futura ou estoque de carbono futuro, em m^3/ha ou kg/ha , respectivamente;

I_1 = idade presente, em meses;

I_2 = idade futura, em meses;

B_1 = área basal presente, em m^2/ha ;

B_2 = área basal futura, em m^2/ha ;

S_i = índice de local, na idade presente; e
 b_0, \dots, b_5 = parâmetros do modelo.

A precisão das equações ajustadas e a exatidão das estimativas também foram avaliadas, por meio do coeficiente de determinação (R^2), do erro-padrão da estimativa ($S_{y.x}$), do coeficiente de variação (CV%) e da análise gráfica dos resíduos percentuais, respectivamente.

4.6. Determinação da idade técnica de colheita

A determinação das idades técnicas de colheita (ITCs), idades em que ocorrem as máximas produtividades médias, considerando três classes de produtividade (alta, média e baixa), foi feita com base no máximo incremento médio mensal (IMM). As estimativas das áreas basais iniciais (32 meses), nas três classes de produtividade, foram obtidas pela equação referente ao seguinte modelo:

$$B_i = b_0 + \frac{b_1}{S} + e \quad (6)$$

em que

B_i = área basal inicial, aos 32 meses, em m^2/ha ;

S = índice de local;

b_0 e b_1 = parâmetros do modelo; e

e = erro aleatório.

Para verificar a precisão da equação ajustada, foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2), o erro-padrão da estimativa ($S_{y.x}$) e o coeficiente de variação (CV%). A exatidão das estimativas foi verificada por meio da análise gráfica dos resíduos percentuais (R%).

4.7. Conversão de carbono para CO₂ equivalente

Tendo em vista que as equações fornecem estimativas da quantidade de carbono estocado no fuste e que as negociações no mercado de créditos de carbono são realizadas com base no CO₂ equivalente, houve a necessidade de realizar a conversão das estimativas, visando avaliação econômica. Para isso, assumiu-se que 1 tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO₂, ou que uma tonelada de CO₂ equivale a 0,27 tonelada de carbono (FACE, 1994).

4.8. Cenários avaliados

Com as estimativas médias por hectare do estoque volumétrico e de carbono estocado no fuste (madeira+casca) na forma de CO₂ equivalente, nas três classes de produtividade, realizou-se a análise econômica para dois cenários (Tabela 3).

Para o cenário 1, avaliou-se o projeto sem a geração dos créditos de carbono. A análise econômica foi realizada, considerando os custos referentes ao projeto florestal e as receitas obtidas apenas pela venda da madeira.

Tabela 3 – Cenários avaliados

Cenário	Descrição dos Produtos
1 - Sem CERs	Madeira
2 - Com CERs	Madeira + créditos de carbono

No cenário 2, além dos custos do projeto florestal e da receita obtida pela venda da madeira, foi incluída a receita proveniente da venda dos créditos de carbono (CERs). Neste cenário não foram considerados os custos de transação do projeto de créditos de carbono como: custos de elaboração do projeto, identificação de investidores, preparo de documentação, dentre outros, e também os custos das emissões de CO₂ atribuídas às florestas.

Para os dois cenários, as análises econômicas foram realizadas ao considerar três classes de produtividade (baixa, média e alta). Além disso, considerou-se não haver restrições de mercado quanto à comercialização da madeira e dos créditos de carbono.

4.9. Análise econômica

A viabilidade econômica dos cenários considerados foi avaliada por meio de critérios econômicos que consideram a variação do capital ao longo do tempo, entre eles:

- **Valor presente líquido (VPL)**

É definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado. A viabilidade econômica é indicada pela diferença positiva entre receitas e custos, atualizados de acordo com determinada taxa de desconto (REZENDE e OLIVEIRA, 2001). Quanto maior for o VPL, mais atrativo será o projeto.

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j} \quad (7)$$

em que

VPL = valor presente líquido, em R\$/ha;

R_j = receita no final do ano j ou do período de tempo considerado, em R\$/ha;

C_j = custo no final do ano j ou do período de tempo considerado, em R\$/ha;

j = período de tempo, em anos;

i = taxa de desconto, em % ao ano; e

n = duração do projeto, em anos.

- **Valor anual equivalente (VAE) ou benefício (custo) periódico equivalente (B(C)PE)**

De acordo com SILVA et al. (2002), este critério transforma o valor atual do projeto ou o seu VPL em fluxo de receitas ou custos periódicos e contínuos, equivalente ao valor atual, durante a vida útil do projeto.

O projeto será economicamente viável se apresentar VAE positivo, indicando que os benefícios periódicos são maiores que os custos periódicos e que deve ser escolhido o projeto que apresentar maior VAE para determinada taxa de desconto (REZENDE e OLIVEIRA, 2001).

$$VAE = \frac{VPL \cdot i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (8)$$

em que

VAE = valor anual equivalente, em R\$/ha;

VPL = valor presente líquido, em R\$/ha;

i = taxa de desconto, em % ao ano; e

n = duração do projeto, em anos.

Esse critério foi utilizado, também, para definição da rotação econômica para cada cenário e condição de produtividade, isto é, as idades em que ocorreram o máximo retorno econômico.

- **Taxa interna de retorno (TIR)**

É a taxa de desconto que iguala o valor presente das receitas ao valor presente dos custos, ou seja, iguala o VPL a zero. Também pode ser entendida como a taxa porcentual do retorno do capital investido (SILVA et al., 2002). O projeto que fornecer a maior TIR será considerado o de maior atratividade econômica.

$$\sum_{j=0}^n R_j (1 + TIR)^{-j} = \sum_{j=0}^n C_j (1 + TIR)^{-j} \quad (9)$$

em que

TIR = taxa interna de retorno;

R_j = receita no final do ano j ou do período de tempo considerado, em R\$/ha;

C_j = custo no final do ano j ou do período de tempo considerado, em R\$/ha;

j = período de ocorrência dos custos e receitas; e

n = duração do projeto, em anos.

- **Razão benefício/custo (B/C)**

Consiste em calcular a razão entre o valor atual das receitas e o valor atual dos custos. Logo, o projeto é economicamente viável se apresentar $B/C > 1$ (SILVA et al., 2002).

$$B/C = \frac{\sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}} \quad (10)$$

em que

B/C = razão benefício-custo;

R_j = receita no final do ano j ou do período de tempo considerado, em R\$/ha;

C_j = custo no final do ano j ou do período de tempo considerado, em R\$/ha;

i = taxa de desconto, em % ao ano;

j = período de ocorrência dos custos e das receitas; e

n = duração do projeto, em anos.

- **Valor esperado da terra (VET)**

O VET é um termo florestal usado para representar o valor presente líquido de uma área de terra nua, a ser utilizada para produção de madeira,

calculado com base em uma série infinita de rotações. É utilizado também para determinar rotação econômica e preço máximo de compra de terra nua, considerando uma série infinita, bem como para selecionar projetos alternativos (SILVA et al., 2002). O cálculo é baseado na receita líquida perpétua do projeto ($R_t - C_t$), excluindo o custo da terra, a ser obtida de uma dada cultura, de modo que:

$$VET = \frac{R_t - C_t}{(1 + i)^n - 1} \quad (11)$$

em que

VET = valor esperado da terra, em R\$/ha;

R_t = receita total do projeto, em R\$/ha;

C_t = custo total do projeto, em R\$/ha;

i = taxa de desconto, em % ao ano; e

n = duração do projeto, em anos.

A taxa de desconto utilizada foi de 10% ao ano. Optou-se por essa taxa pelo fato de ser bastante aplicada em análises de projetos florestais. De acordo com Lima Júnior (1995), existe uma grande dificuldade de determinar a taxa de desconto a ser utilizada nos investimentos florestais, uma vez que ela não pode ser padronizada, já que podem ocorrer variações de acordo com as características do projeto, da empresa, entre outros. Portanto, o autor afirma que a taxa de desconto utilizada em projetos florestais geralmente varia de 6 a 12% ao ano.

4.10. Custos e receitas

Na análise econômica foram considerados os custos operacionais, por hectare, referentes às atividades envolvidas em um projeto de reflorestamento, como: custos de implantação; custo da terra; custos de manutenção como controle de mato-competição, combate às formigas, adubações etc.; e os custos de exploração e transporte florestal, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Custos utilizados na análise econômica

Itens	Valores
Custo de implantação (R\$/ha)	1.800,00
Custo de manutenção – 1º ano (R\$/ha)	275,00
Custo de manutenção – 2º ano (R\$/ha)	260,00
Custo de manutenção – 3º ano (R\$/ha)	25,00
Custo de manutenção – demais anos (R\$/ha)	25,00
Custo de colheita e transporte (R\$/m³)	20,00
Custo anual da terra (R\$/ha)	200,00

Fonte: Empresas do setor em Minas Gerais.

As receitas por hectare, considerando a venda da madeira e dos créditos de carbono (CERs), foram obtidas no multiplicar as estimativas encontradas desses produtos pelos seus respectivos preços de mercado (Tabela 5). Para análises da viabilidade econômica, considerou-se que as receitas provenientes dos CERs ocorreram no ano zero, ou seja, no ano de implantação da cultura (pagamento antecipado).

Optou-se por usar o valor atribuído à Bolsa de Chicago, por causa da grande influência que esta instituição tem nas negociações do mercado dos créditos de carbono.

Tabela 5 – Preços para a madeira e para o carbono na forma de CO₂ eq

Item	Preço	
	(R\$/m³)	(R\$/t CO₂ eq)
Madeira	50,00	-
CO ₂ seqüestrado	-	6,00*

* Valor sugerido na Bolsa de Chicago: US\$2,72, considerando US\$1,00 igual a R\$2,20, em maio de 2006.

Fonte: empresas do setor (madeira) e Bolsa de Chicago (CO₂).

4.11. Análise de sensibilidade

Foram feitas análises de sensibilidade, considerando o critério econômico VPL, com o propósito de identificar pontos de nivelamento entre

os diferentes usos, por meio da variação da taxa de desconto, dos custos de implantação e colheita e dos preços da madeira e dos CERs, em amplitude de $\pm 20\%$.

Da mesma forma, variaram-se o volume e o estoque de carbono até encontrar quais são as produtividades mínimas que tornam os projetos viáveis economicamente, de acordo com o critério VPL, considerando os dados da Tabela 4.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6 apresenta as estimativas médias das variáveis mensuradas, entre as 532 árvores-amostra utilizadas para os ajustes da equações de volume com casca (Vcc) e de carbono no fuste (CF), por classe de diâmetro. Nele, observa-se o aumento das estimativas das variáveis com o aumento do diâmetro.

Tabela 6 – Valores médios das variáveis mensuradas nas diferentes classes diamétricas

Classe de DAP (cm)	DAP (cm)	Ht (m)	Vcc (m ³)	Densidade da Madeira (kg/m ³)	Densidade da Casca (kg/m ³)	Biomassa no Fuste (kg)	Carbono no Fuste (kg)
9	9,5	18,6	0,0654	478,61	283,35	29,62	14,81
11	10,4	19,6	0,0809	481,87	284,19	36,87	18,43
13	12,8	23,3	0,1434	489,47	286,147	66,41	33,21
15	15,4	25,5	0,2253	496,26	287,88	105,84	52,92
17	16,9	27,0	0,2893	499,88	288,79	136,96	68,48
19	18,7	28,1	0,3607	503,58	289,73	171,89	85,95
21	21,3	28,7	0,4634	508,55	290,98	223,05	111,53
23	22,9	31,2	0,5916	511,42	291,70	287,05	143,53
25	24,8	32,4	0,6918	514,38	292,44	337,54	168,77
27	27,3	34,7	0,8887	518,18	293,38	438,35	219,18
29	29,1	34,6	0,9926	520,65	293,99	494,61	247,31
31	30,5	37,2	1,1597	522,51	294,45	576,58	288,29
33	33,2	41,2	1,5546	525,89	295,29	786,33	393,163
35	34,8	44,1	1,8289	527,71	295,74	923,82	461,91
37	37,3	45,5	2,0713	530,42	296,40	1.058,92	529,46

5.1. Equações de volume com casca e carbono no fuste

As equações ajustadas para estimar o volume total com casca e o carbono total dos fustes das árvores individuais de eucalipto, e as respectivas medidas de precisão, foram:

- **Volume total com casca (Vcc)**

$$V_{cc} = 0,0000423 \cdot DAP^{1,8373} \cdot Ht^{1,0964} \quad (12)$$

$$R^2 = 99,52\% \quad S_{y,x} = \pm 0,0600 \ln(m^3) \quad CV = 7,10\%$$

- **Carbono total no fuste (CF)**

$$CF = 0,007285 \cdot DAP^{1,8882} \cdot Ht^{1,1496} \quad (13)$$

$$R^2 = 98,55\% \quad S_{y,x} = \pm 0,0597 \ln(kg) \quad CV = 7,09\%$$

Os gráficos de distribuição dos resíduos percentuais das equações anteriores (Figura 1) mostram que eles estão distribuídos uniformemente e não apresentam tendências de super ou subestimação.

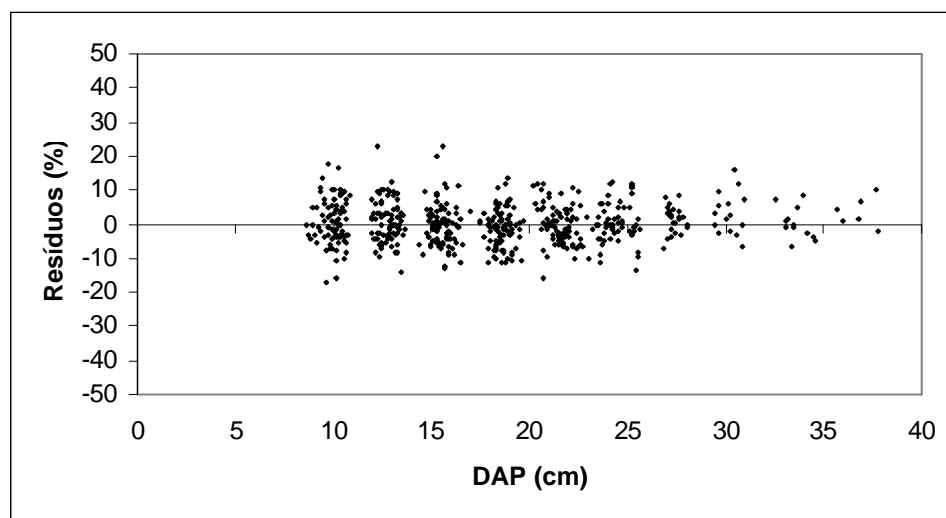
5.2. Classificação da capacidade produtiva

De posse dos valores de altura dominante e de idade, ajustou-se a seguinte equação:

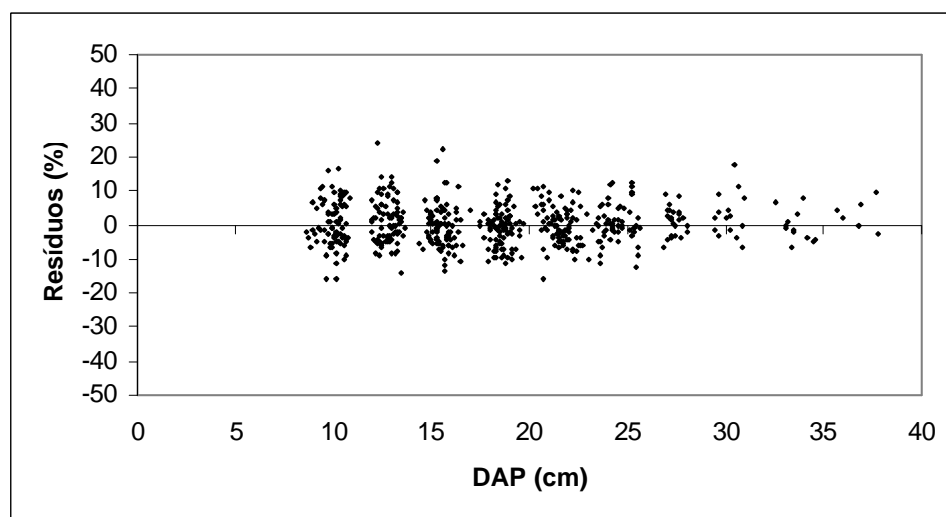
$$\ln Hd = 3,63015 - 27,29013 \left(\frac{1}{I} \right) \quad R^2 = 58,0\% \quad (14)$$

Para construção das curvas de índice de local e definição das classes de produtividade (Figura 2), a equação foi então modificada para:

$$\ln Hd = \ln S - 27,29013 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{60} \right) \quad (15)$$



(A)



(B)

Figura 1 – Distribuição dos resíduos percentuais das equações que estimam o volume total com casca (A) e o carbono total dos fustes (B) das árvores de eucalipto.

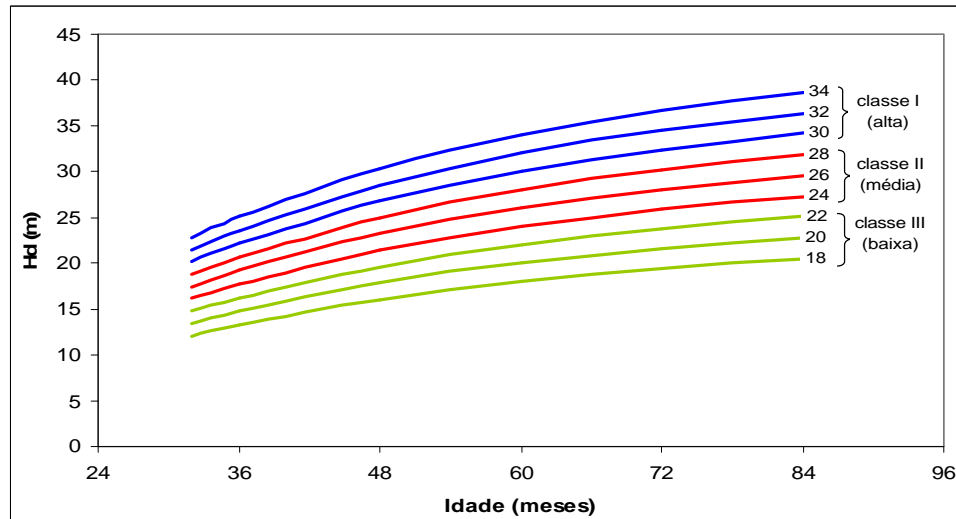


Figura 2 – Curvas de índice local.

5.3. Predição do estoque volumétrico e do estoque de carbono

As equações ajustadas referentes ao modelo de Clutter (1963) que foram utilizadas para projeção das produções futuras do volume com casca, do estoque de carbono e da área basal por hectare, com suas respectivas medidas de precisão, são:

- **Área basal**

$$\ln B_2 = \ln B_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + 3,3425 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + 0,0131 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S \quad (16)$$

$$R^2 = 96,91\%$$

$$S_{y,x} = \pm 0,0423 \ln(\text{m}^2/\text{ha})$$

$$CV = 4,02\%$$

- **Volume com casca**

$$\ln V_{cc_2} = 1,5760 - 19,2699 \left(\frac{1}{I_2} \right) + 0,0287 S + 1,1249 \ln B_2 \quad (17)$$

$$R^2 = 98,73\%$$

$$S_{y,x} = \pm 0,0416 \ln(\text{m}^3/\text{ha})$$

$$CV = 4,18\%$$

- **Carbono total no fuste**

$$\ln CF_2 = 6,9747 - 20,6133 \left(\frac{1}{I_2} \right) + 0,0308S + 1,1327 \ln B_2 \quad (18)$$

$$R^2 = 98,62\%$$

$$S_{y,x} = \pm 0,0445 \ln(\text{Kg/ha})$$

$$CV = 4,48\%$$

As medidas de precisão das equações indicam que elas se ajustaram bem aos dados observados. Os gráficos de dispersão dos valores observados, em relação aos estimados (Figuras 3 e 4), mostram não haver tendência de super ou subestimação, tanto para o estoque em volume quanto para o estoque de carbono e da área basal por hectare, pelas equações ajustadas.

5.4. Idades técnicas de colheita

De posse das equações que projetam produções futuras do estoque volumétrico com casca, do estoque de carbono no fuste e da área basal por hectare, foram elaboradas tabelas de produção (Tabelas 7 e 8), considerando três classes de produtividade (S=20, S=26 e S=32). As áreas basais iniciais (I = 32 meses), para cada classe de produtividade, foram obtidas pela seguinte equação:

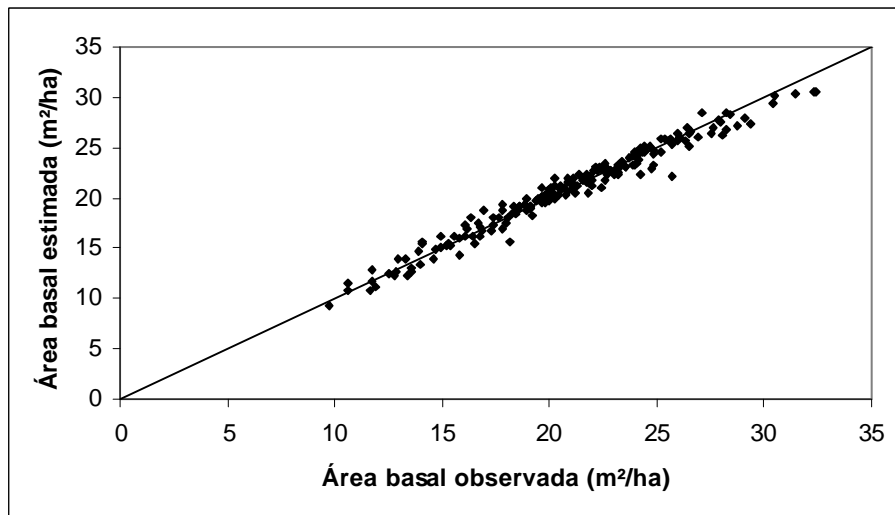
$$B_i = 28,2292 - \frac{456,1350}{S} \quad (19)$$

$$R^2 = 74,35\%$$

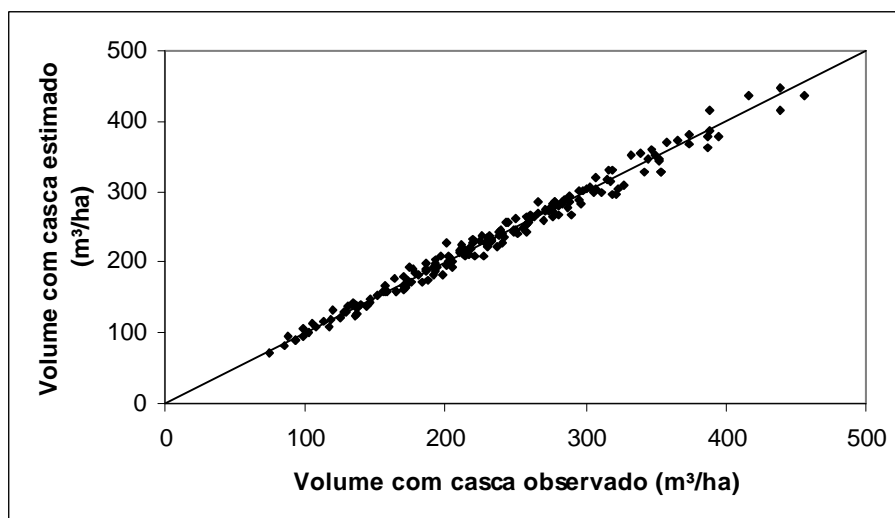
$$S_{y,x} = \pm 1,4772 \text{ m}^2/\text{ha}$$

$$C.V. = 16,40\%$$

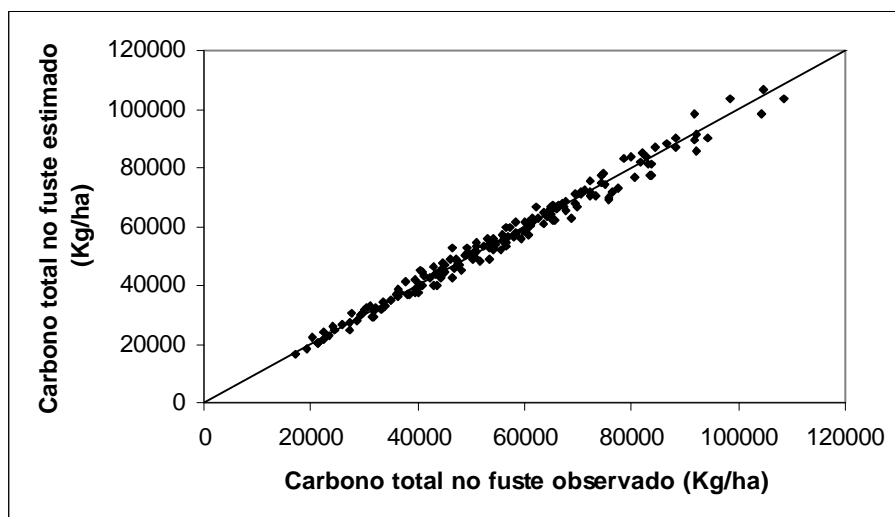
De acordo com as estimativas apresentadas nos Tabelas 7 e 8, as idades técnicas de colheita - ITCs (idades onde ocorrem as máximas produtividades médias e valores em destaque), considerando as três classes de produtividade, foram (Tabelas 9 e 10 e Figura 5).



(A)

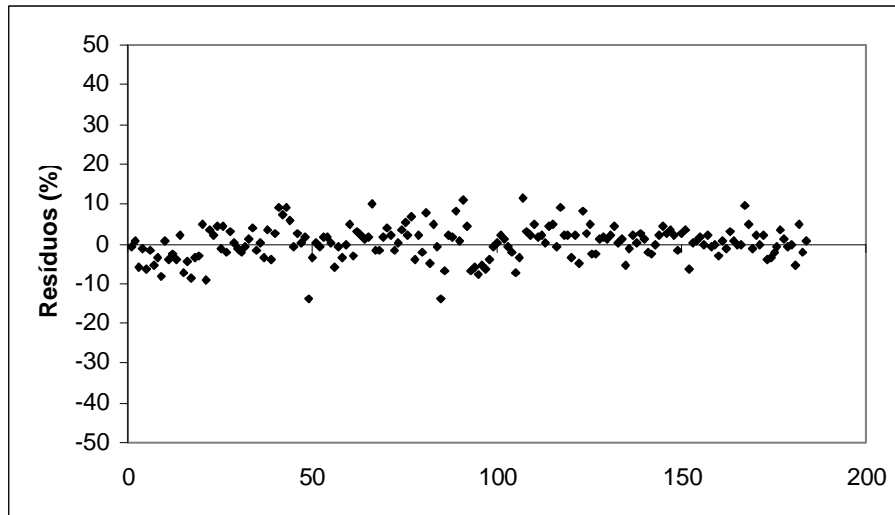


(B)

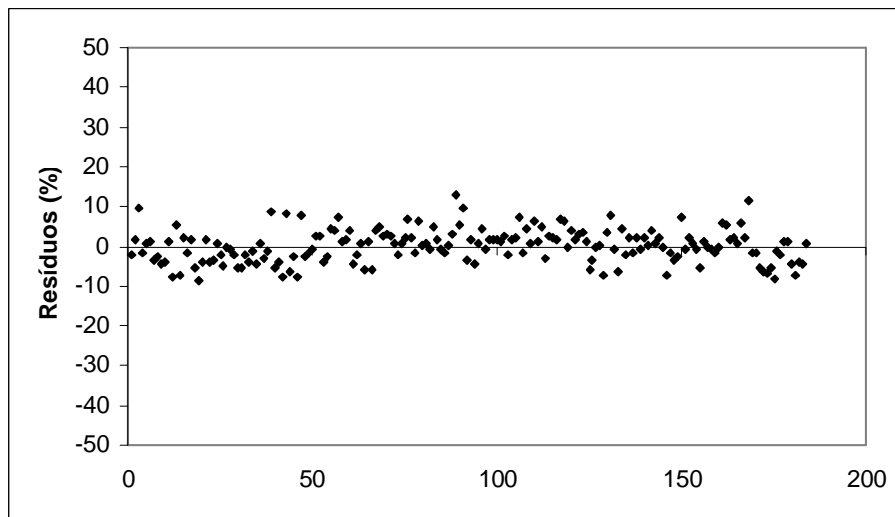


(C)

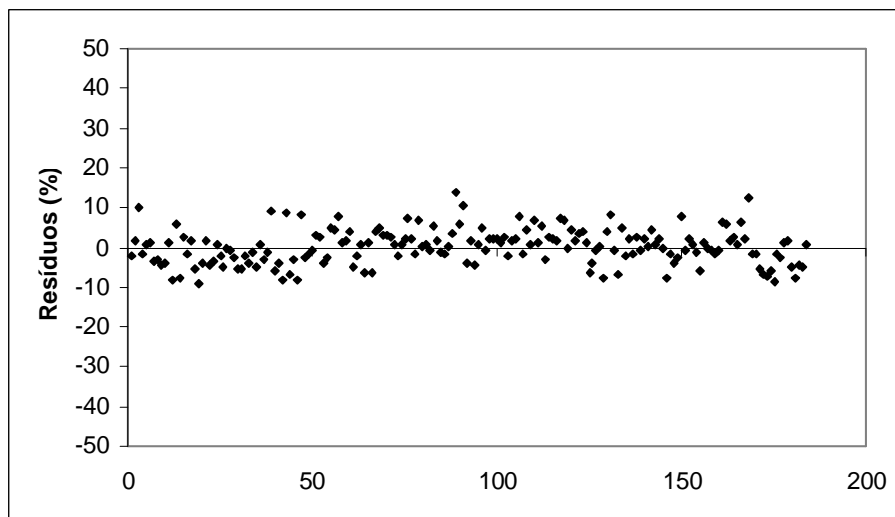
Figura 3 – Relação entre os valores observados e estimados de área basal (A), volume com casca (B) e carbono total no fuste (C), por hectare.



(A)



(B)



(C)

Figura 4 – Distribuição dos resíduos percentuais das equações que projetam a área basal (A), o volume com casca (B) e o carbono no fuste (C), por hectare.

Tabela 7 – Tabela de produção para povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em que B = área basal por hectare; Vcc = volume total com casca por hectare; e IMA = incremento médio anual

Idade (meses)	S = 20			S = 26			S = 32		
	B (m ² /ha)	Vcc (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha.ano)	B (m ² /ha)	Vcc (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha.ano)	B (m ² /ha)	Vcc (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha.ano)
24	2,86	12,58	6,29	6,89	40,14	20,07	9,61	69,25	34,62
36	6,71	42,80	14,27	12,37	101,19	33,73	15,84	158,81	52,94
48	10,26	78,95	19,74	16,56	160,68	40,17	20,33	240,49	60,12
60	13,25	114,00	22,80	19,73	212,05	42,41	<u>23,62</u>	<u>308,49</u>	<u>61,70</u>
72	15,71	145,64	24,27	<u>22,18</u>	<u>255,13</u>	<u>42,52</u>	26,11	364,20	60,70
84	<u>17,74</u>	<u>173,48</u>	<u>27,78</u>	24,11	291,16	41,59	28,04	410,04	58,58
96	19,43	197,81	24,73	25,67	321,48	40,19	29,58	448,18	56,02
108	20,86	219,06	24,34	26,95	347,24	38,58	30,84	480,28	53,36

Tabela 8 – Tabela de produção para povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em que B = área basal por hectare; CF = estoque total de carbono no fuste por hectare; e IMA = incremento médio anual

Idade (meses)	S = 20			S = 26			S = 32		
	B (m ² /ha)	CF (t/ha)	IMA (t/ha.ano)	B (m ² /ha)	CF (t/ha)	IMA (t/ha.ano)	B (m ² /ha)	CF (t/ha)	IMA (t/ha.ano)
24	2,86	2,76	1,38	6,89	8,98	4,49	9,61	15,72	7,86
36	6,71	9,63	3,21	12,37	23,17	7,72	15,84	36,88	12,29
48	10,26	18,00	4,50	16,56	37,22	9,30	20,33	56,48	14,12
60	13,25	26,19	5,24	19,73	49,46	9,89	<u>23,62</u>	<u>72,94</u>	<u>14,59</u>
72	15,71	33,63	5,60	<u>22,18</u>	<u>59,79</u>	<u>9,96</u>	26,11	86,50	14,42
84	17,74	40,20	5,74	24,11	68,46	9,78	28,04	97,70	13,96
96	<u>19,43</u>	<u>45,96</u>	<u>5,75</u>	25,67	75,78	9,47	29,58	107,05	13,38
108	20,86	51,01	5,67	26,95	82,00	9,11	30,84	114,93	12,77

Tabela 9 – Idades técnicas de colheita (ITC) e volume total com casca, para três classes de produtividade

Classe de Produtividade	ITC (anos)	Vcc (m ³ /ha)
S = 20	7	173,48
S = 26	6	255,13
S = 32	5	308,49

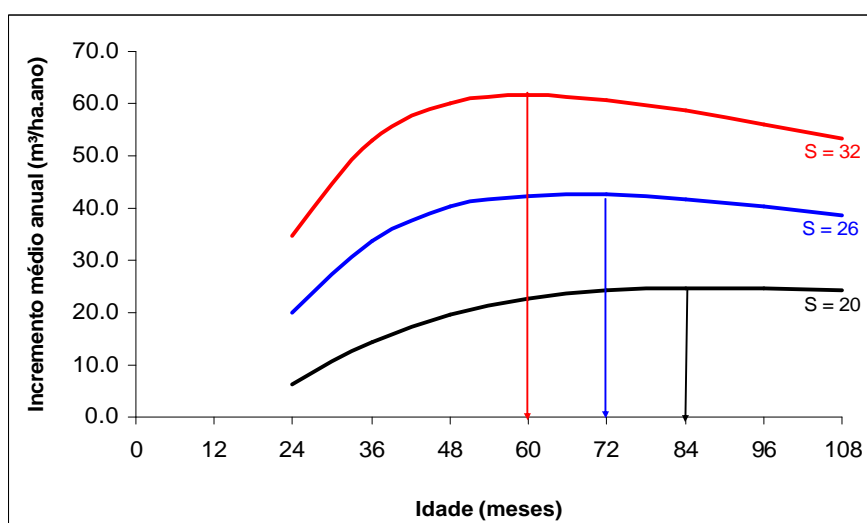
Tabela 10 – Idades técnicas de colheita (ITC) e estoque total de carbono no fuste, para três classes de produtividade

Classe de Produtividade	ITC (anos)	Estoque de Carbono (t/ha)	Estoque de CO ₂ (eq) (tCO ₂ /ha)*
S = 20	8	45,96	168,67
S = 26	6	59,79	219,43
S = 32	5	72,94	267,69

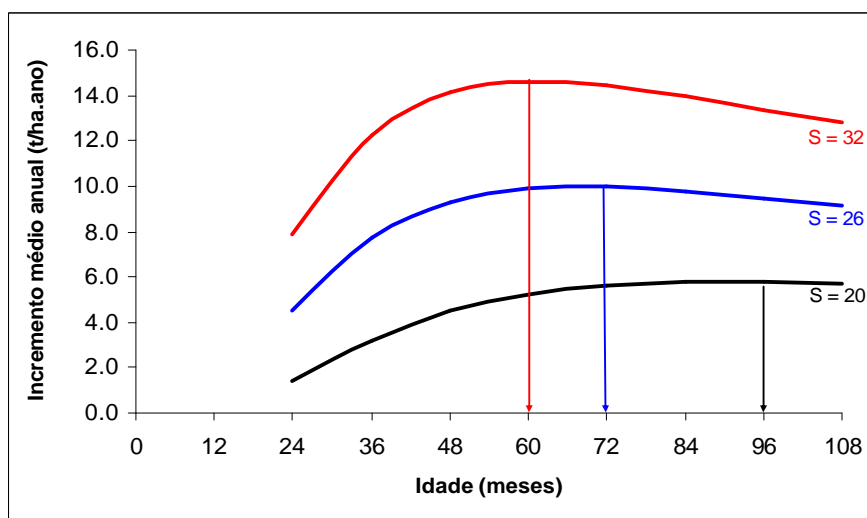
* Estoque de carbono x 3,67 (fator de conversão de carbono para CO₂ equivalente).

Tanto para o estoque volumétrico quanto para o estoque de carbono por hectare, observou-se diminuição da idade técnica de colheita (ITC) com o aumento da capacidade produtiva. Observou-se, ainda, uma diferença mínima das ITCs estimadas pelas equações que projetam o estoque volumétrico e o estoque de carbono por hectare.

Ao serem consideradas as densidades básicas de cada árvore-amostra no ajuste da equação de carbono, incluiu-se mais uma fonte de variação aos dados, de tal forma que as estimativas dos coeficientes das equações de volume e carbono, embora apresentem valores próximos, são diferentes. Assim, ao serem totalizadas as parcelas permanentes, foram geradas ITCs um pouco diferentes.



(A)



(B)

Figura 6 – Curvas de incremento médio anual para o volume total com casca (A) e para o carbono total no fuste por hectare (B), considerando as três classes de produtividade.

5.5. Análise econômica

5.5.1. Determinação da rotação econômica

Com a estrutura de custos e receitas e da taxa de desconto adotados neste estudo, foram determinadas as seguintes rotações econômicas, nos dois cenários estudados, sem e com os CERs (Tabela 11).

Tabela 11 – Rotação econômica, volume total com casca por hectare (Vcc), e estoque de CO₂ equivalente por hectare, para os cenários considerados

Cenário 1 – Somente Madeira			
Classe de Produtividade	Rotação Econômica (anos)	Vcc (m³/ha)	
S = 20	8	197,84	
S = 26	6	255,16	
S = 32	5	308,49	

Cenário 2 – Madeira + CERs			
Classe de Produtividade	Rotação Econômica (anos)	Vcc (m³/ha)	CO₂ (eq) (tCO₂/ha)
S = 20	9	219,09	187,22
S = 26	6	255,16	219,44
S = 32	5	308,49	267,68

Semelhantemente às idades técnicas de colheita (ITCs), no item 5.4, observou-se diminuição da rotação econômica com o aumento da capacidade produtiva, tanto para o estoque volumétrico quanto para o estoque de carbono por hectare.

Cabe ressaltar que a rotação econômica foi maior do que a idade técnica de colheita (ITC), para o local de baixa produtividade (S = 20), nos dois cenários avaliados. No local de maior produtividade, a rotação econômica foi praticamente igual à ITC.

De acordo com a teoria econômica, a rotação econômica é igual ou maior do que a idade técnica de colheita. Essas diferenças são devidas aos diversos fatores envolvidos em um projeto florestal, como o espaçamento, a

produtividade do local, os tratos silviculturais, o estágio de produção que se encontra a floresta, o horizonte de planejamento, a taxa de desconto, os custos de produção e as receitas auferidas, ou, ainda, podem surgir simplesmente por razões metodológicas.

5.5.2. Análise de viabilidade econômica

De acordo com os dados apresentados no Tabela 12, verificou-se que os locais de média e alta produtividade (S = 26 e S = 32) foram considerados viáveis economicamente para os cenários sem e com os CERs. Locais com baixa produtividade (S = 20) foram considerados inviáveis economicamente no cenário sem os CERs e viáveis economicamente no cenário com os CERs. Desta forma, verificou-se que a inclusão dos créditos de carbono contribui positivamente para a viabilidade econômica de projetos florestais em locais de baixa produtividade.

Tabela 12 – Avaliação econômica para os dois cenários estudados

Critério de Comparação	Cenário	Classes de Produtividade		
		S = 20	S = 26	S = 32
VAE (R\$/ha.ano)	Sem CERs	-130,55	247,07	693,43
	Com CERs	60,79	549,38	1.117,11
VPL (R\$/ha)	Sem CERs	-696,48	1.076,06	2.628,65
	Com CERs	350,12	2.392,71	4.234,74
TIR (% a.a.)	Sem CERs	7,57	14,27	21,36
	Com CERs	11,30	21,75	34,05
B/C	Sem CERs	0,869	1,176	1,378
	Com CERs	1,065	1,391	1,609
VET (R\$/ha)	Sem CERs	694,49	4.470,72	8.934,31
	Com CERs	2.607,94	7.493,85	13.171,13

Taxa de desconto = 10% a.a.

Ao comparar os cenários sem e com os CERs, em termos de valor anual equivalente (VAE), haja vista que os projetos apresentam horizontes de planejamento diferentes (Tabela 12 e a Figura 7), observa-se que o local de alta produtividade (S = 32) foi o mais atrativo economicamente, com

receitas anuais de R\$693,43/ha (sem os CERs) e R\$1.117,11/ha (com a inclusão dos CERs), ou seja, um aumento de 61% nas receitas. O local de média produtividade (S = 26) também se mostrou viável, com aumento da receita anual de R\$247,07/ha para R\$549,38/ha, após a inclusão dos CERs.

Esse aumento significativo do VAE se deve ao fato de receitas auferidas pelos CERs serem consideradas na implantação do projeto, não sofrendo, portanto, descapitalização, mesmo sendo uma receita pequena.

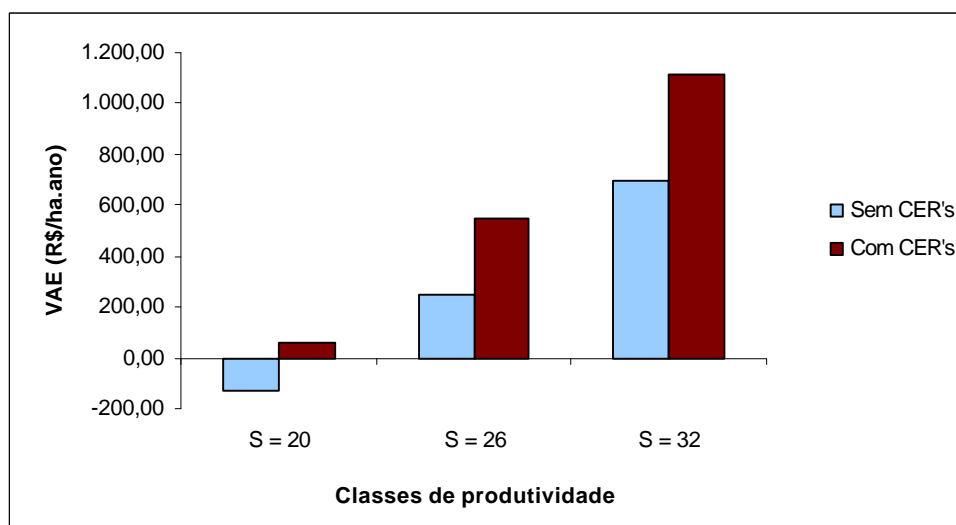


Figura 7 – Valor anual equivalente (VAE), em R\$/ha.ano, para as três classes de produtividade, considerando os dois cenários avaliados, e a taxa de desconto igual a 10% a.a.

5.5.3. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade, considerando o critério VPL, foi realizada para os dois cenários estudados, submetendo a taxa de desconto, os preços da madeira e dos CERs e os custos de implantação e colheita a variações de seus valores nominais em $\pm 20\%$.

Também, para os dois cenários, variaram-se os volumes de madeira e os estoques de carbono para encontrar quais as produtividades mínimas que mantêm ou tornam os projetos viáveis economicamente.

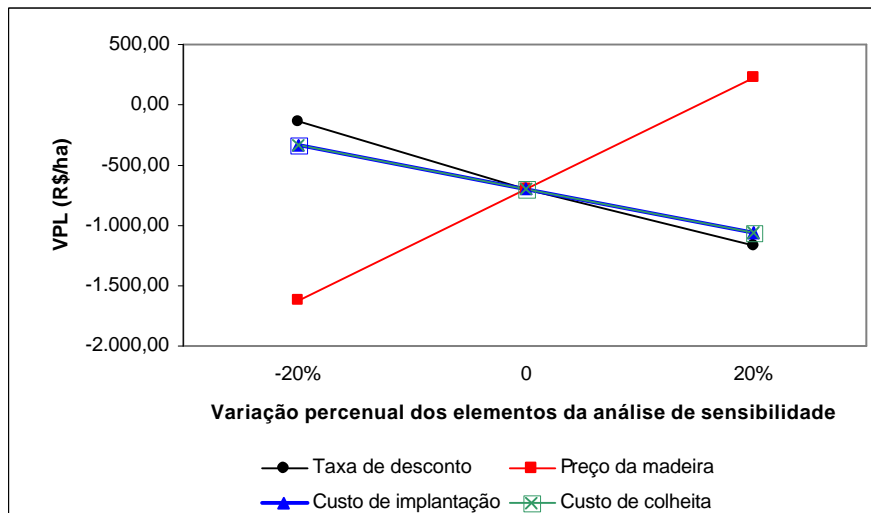
- **1º Cenário – Sem os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs)**

De acordo com a Tabela 13 e a Figura 8A, no local de baixa produtividade ($S = 20$), o decréscimo de 20% na taxa de desconto, no custo de implantação ou no custo de colheita, não foi suficiente para torná-lo viável economicamente. Mas, o aumento em 20% no preço da madeira tornou o local viável economicamente. Mantendo-se constante a taxa de desconto em 10% a.a. e os demais custos, o preço da madeira deveria ser superior a R\$57,55/m³, ou seja, um aumento de 15,10% em relação ao preço inicial de R\$50,00/m³ para manter o projeto viável economicamente, nessa classe de produtividade.

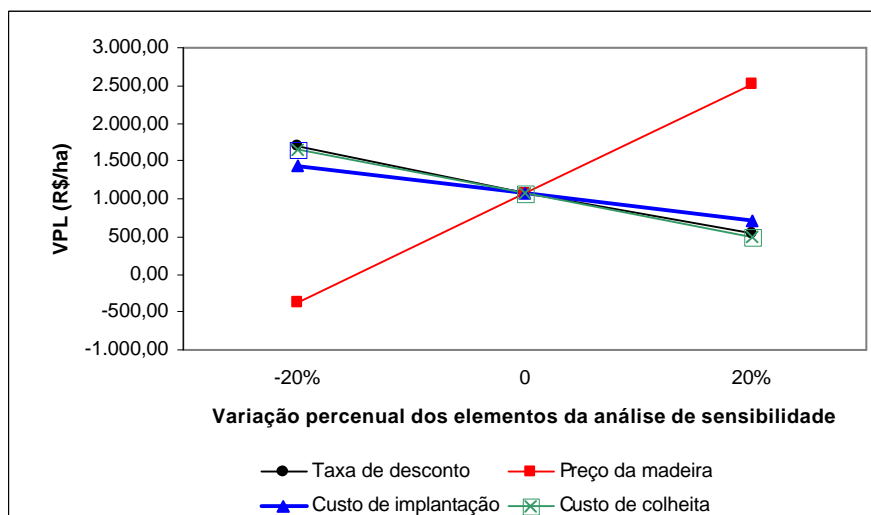
Tabela 13 – Análise de sensibilidade considerando o cenário sem os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs)

Classe de Produtividade	Variável	VPL		
		-20%	0	20%
S=20	Taxa de desconto	-134,13	-696,48	-1.172,15
	Preço da madeira	-1.619,40	-696,48	226,44
	Custo de implantação	-336,48	-696,48	-1.056,48
	Custo de colheita	-327,31	-696,48	-1.065,65
S=26	Taxa de desconto	1.690,98	1.076,06	535,77
	Preço da madeira	-364,23	1.076,06	2.516,35
	Custo de implantação	1.436,06	1.076,06	716,06
	Custo de colheita	1.652,18	1.076,06	499,95
S=32	Taxa de desconto	3.282,42	2.628,65	2.043,31
	Preço da madeira	713,17	2.628,65	4.544,14
	Custo de implantação	2.988,65	2.628,65	2.268,65
	Custo de colheita	3.394,84	2.628,65	1.862,46

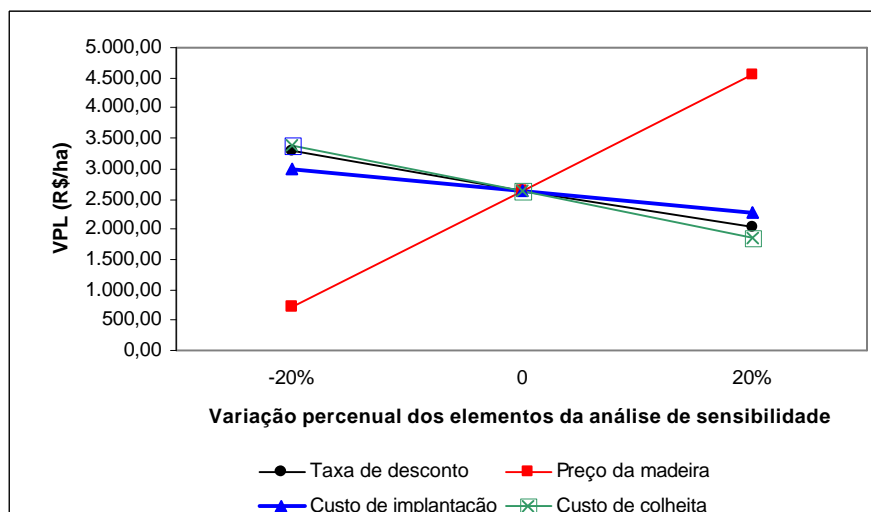
Para o local de média produtividade ($S = 26$), observou-se que somente um decréscimo de 20% no preço da madeira tornou o local inviável financeiramente (Tabela 13 e Figura 8B). Por outro lado, o preço da madeira acrescido em 20% elevou o valor do VPL de R\$1.076,06/ha para R\$2.516,35/ha. Mantendo constantes a taxa de desconto e os demais custos, o preço da madeira poderia chegar a R\$42,53/m³ para que o projeto instalado neste local fosse viável economicamente, isto é, uma redução de 14,94% em relação ao valor inicial de R\$50,00/m³.



(A)



(B)



(C)

Figura 8 – Valor presente líquido (VPL) para as três classes de produtividade: S = 20 (A), S = 26 (B) e S = 32 (C), sem os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs).

O local de alta produtividade ($S = 32$) permaneceu viável economicamente, considerando as mudanças nas variáveis analisadas (Tabela 13 e Figura 8C). O aumento de 20% no preço da madeira fez com que o VPL crescesse em 72%, passando de R\$2.628,65/ha para R\$4.544,14/ha. Neste local, o preço da madeira poderia chegar até R\$36,28/m³ para que o projeto continuasse sendo viável, se as outras variáveis permanecessem constantes, ou seja, redução de 27,44% em relação ao preço adotado de R\$50,00/m³.

Nesse cenário, destinado apenas para a produção de madeira, sem os créditos de carbono, mantendo-se constantes a taxa de desconto, os custos e o preço da madeira e o horizonte de planejamento, o local de baixa produtividade ($S = 20$) se tornaria viável economicamente, pelo critério VPL, se a produtividade aumentasse em 25,15%, passando de 197,84 m³/ha para 247,60 m³/ha.

- **2º Cenário – Com os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs)**

De acordo com a Tabela 14 e a Figura 9, o acréscimo de 20% no preço dos créditos de carbono influenciou muito pouco o VPL nas três classes de produtividade. Isso se deve ao fato de a receita proveniente dos CERs ser muito menor do que aquela obtida pela venda da madeira e ter valor menor do que os custos adotados neste estudo.

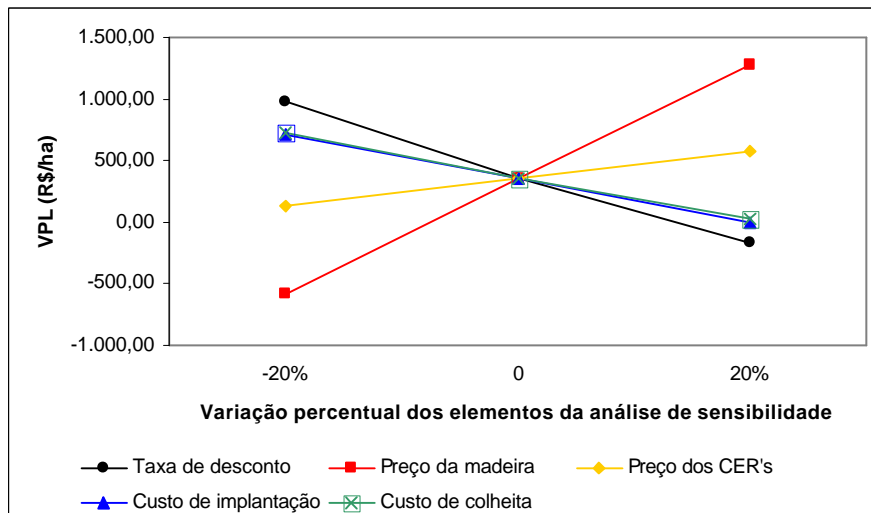
No local de baixa produtividade ($S = 20$), o projeto tornou-se inviável com o aumento de 20% na taxa de desconto e nos custos de implantação e de colheita, e com a redução de 20% no preço da madeira (Tabela 14 e Figura 9A). Neste caso, mantendo-se constante a taxa de desconto, os custos e o preço dos CERs, o preço da madeira poderia ser de R\$46,23/m³ para que o local continuasse economicamente viável (redução de 8,15% em relação ao preço inicial de R\$50,00/m³). Já o preço dos CERs poderia sofrer decréscimo de, no máximo, 31,16%, passando de R\$6,00/tonelada para R\$4,13/tonelada, se os custos e o preço da madeira permanecessem constantes.

Tabela 14 – Análise de sensibilidade considerando o cenário com os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs)

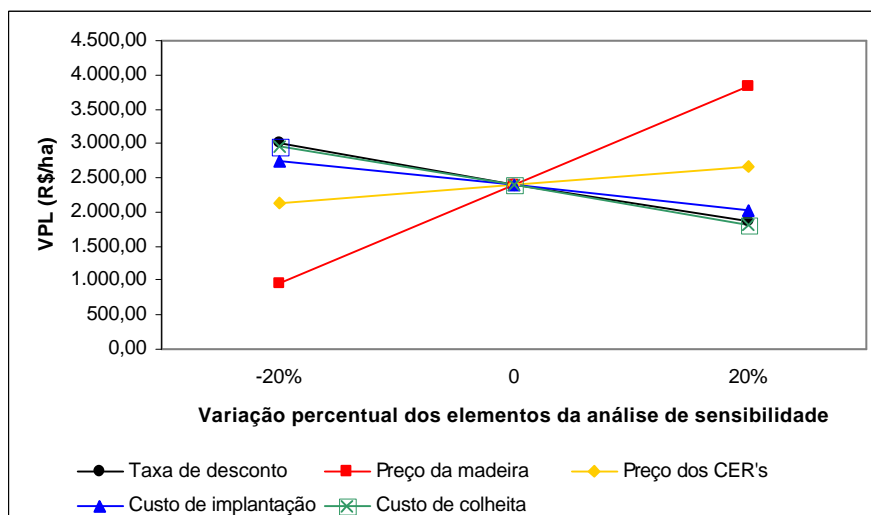
Classe de Produtividade	Variável	VPL		
		-20%	0	20%
S=20	Taxa de desconto	978,08	350,12	-171,30
	Preço da madeira	-579,03	350,12	1.279,26
	Preço dos CERs	125,45	350,12	574,78
	Custo de implantação	710,12	350,12	-9,88
	Custo de colheita	721,78	350,12	-21,54
S=26	Taxa de desconto	3.007,63	2.392,71	1.852,43
	Preço da madeira	952,42	2.392,71	3.833,00
	Preço dos CERs	2.129,38	2.392,71	2.656,04
	Custo de implantação	2.752,71	2.392,71	2.032,71
	Custo de colheita	2.968,83	2.392,71	1.816,60
S=32	Taxa de desconto	4.888,50	4.234,74	3.649,39
	Preço da madeira	2.319,25	4.234,74	6.150,22
	Preço dos CERs	3.913,25	4.234,74	4.555,95
	Custo de implantação	4.594,74	4.234,74	3.874,74
	Custo de colheita	5.000,93	4.234,74	3.468,54

O local de média produtividade (S = 26) manteve-se economicamente viável para todas as situações analisadas (Tabela 14 e Figura 9B). O preço da madeira também foi o que mais influenciou o valor do VPL. O aumento de 20% no preço da madeira fez com que o VPL crescesse em 60,19%, passando de R\$2.392,71/ha para R\$3.833,00/ha. Ao sustentar a taxa de desconto em 10% a.a., os custos de implantação e colheita e o preço dos CERs, o preço inicial da madeira de R\$50,00/m³ poderia ser reduzido em 33,22%, passando para R\$33,39/m³, para que o local se mantivesse viável economicamente.

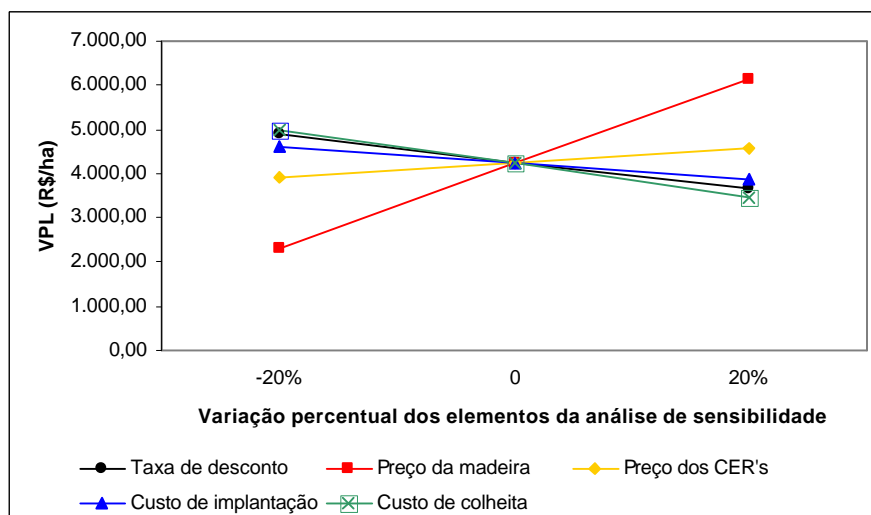
Para o local de alta produtividade (S = 32) (Tabela 14 e Figura 9C), os resultados mostraram viabilidade econômica em todas as alternativas analisadas. Mais uma vez o preço da madeira influenciou mais a análise, tendo o aumento de 20% contribuído para que o VPL crescesse em 45,23%, passando de R\$4.234,74/ha para R\$6.150,22/ha. Neste caso, o preço madeira poderia chegar até R\$27,89/m³ para que o local continuasse sendo viável economicamente, se as outras variáveis permanecessem constantes, ou seja, redução de 44,22% em relação ao preço adotado de R\$50,00/m³.



(A)



(B)



(C)

Figura 9 – Valor presente líquido (VPL) para as três classes de produtividade: S = 20 (A), S = 26 (B) e S = 32 (C), com os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs).

Para identificar qual a produtividade mínima que torna os projetos que consideram a produção de madeira e os créditos de carbono economicamente viáveis, foi necessário estabelecer uma relação entre a produção de madeira e o estoque de carbono ($\text{CO}_2 \text{ eq}$), haja vista a dependência entre eles (Figura 10).

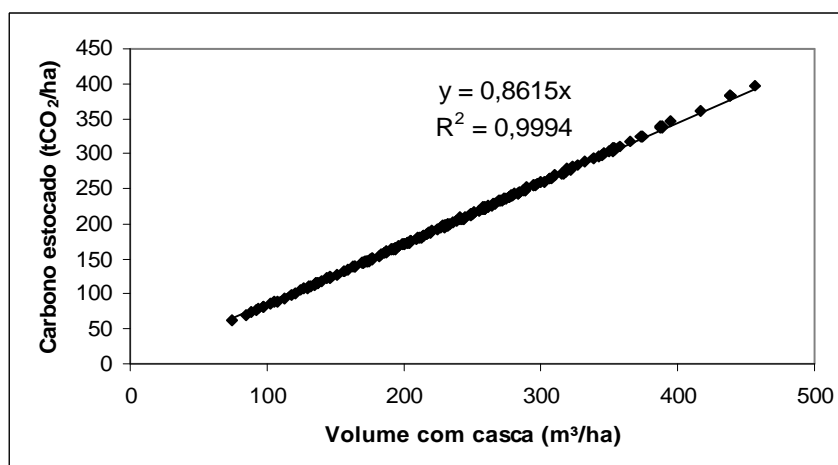


Figura 10 – Relação entre o volume de madeira e o estoque de carbono na forma de CO_2 .

Dessa forma, mantendo-se constantes os custos, os preços, a taxa de desconto e o horizonte de planejamento e utilizando a equação na Figura 10, a produtividade mínima para que um projeto desta natureza fosse economicamente viável, na classe de menor produtividade, seria de $199,01 \text{ m}^3/\text{ha}$.

6. CONCLUSÕES

- O modelo de crescimento e produção proposto por Clutter (1963) foi adequado para prever a produção futura volumétrica e do estoque de carbono, mantendo a coerência entre as idades técnicas de colheita e as capacidades produtivas.

- As Idades Técnicas de Colheita (ITCs) foram praticamente iguais para o estoque volumétrico e para o estoque de carbono.

- Há relação direta, na ordem de 86,15%, entre a produção de madeira, em m³/ha, e o estoque de carbono, em tonelada de CO₂/ha.

- Os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) contribuem positivamente para viabilidade econômica de projetos florestais em locais de baixa produtividade.

- Na análise de sensibilidade, a variação do preço da madeira foi o item que mais afetou a viabilidade econômica dos projetos. Por outro lado, os CERs influenciaram muito pouco.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Reflorestamento – Seqüestro de Carbono. Disponível em: <www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em: 25 mar. 2005.

AMARO, A.; TOMÉ, M. **Empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation.** Oeiras: Edições Salamandra, 1997. 591 p.

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

CAMPOS, C. P. **A conservação das florestas no Brasil, mudança no clima e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto.** 2001. 181 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

CLUTTER, J. L.; FORSTON, J. C.; PIENNAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: A quantitative approach.** New York: John Wiley & Sons, 1983. 333 p.

FACE. Forest absorbing carbon dioxide emission. **Annual Report.** 1993. Arnheim: Netherlands, 1994.

FEARNSIDE, P. M. Biomassa das florestas amazônicas brasileiras. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL. Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 95-124.

FERNANDES, T. J. G. **Contribuição dos certificados de emissões reduzidas (CERs) na viabilidade econômica da heveicultura.** 2003. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

GOMES, J. P. **Os bilhões do carbono**. Disponível em: <http://agenciact.mct.gov.br/index.php?action=/content/view&cod_objeto=27599>. Acesso em: 24 jul. 2005.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL. Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-153.

HOUGHTON, R. A. As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL. Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 39-76.

INFORMMA – INFORMATIVO DO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Especial Protocolo de Quioto. **Mudanças climáticas, o maior problema ambiental do planeta**. Disponível em: <www.mma.gov.br>. Acesso em: 25 mar. 2005.

KRUG, T. A floresta amazônica: fonte ou sumidouro de carbono. **Ação Ambiental**, Viçosa, n. 18, p. 25-27, jun./jul. 2001.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: Rima. 2000. v. 1, 531 p.

LELES, P. S. S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; SILVA, E. **Captura e fluxo de CO₂ atmosférico pelas florestas plantadas e manejadas**. Viçosa: SIF, 1994. 13 p. (Boletim Técnico SIF, 7).

LIMA JÚNIOR, V. B. **Determinação da taxa de desconto para uso na avaliação de projetos de investimentos florestais**. 1995. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

MARTINEZ, C. A. Efeitos do aumento de CO₂ atmosférico no crescimento das plantas. **Ação Ambiental**, Viçosa, v.17, n.21, p.16-19, dez./jan. 2001.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. **Emissões e remoções de dióxido de carbono por mudanças nos estoques de florestas plantadas**. Brasília: MCT/FBDS, 2002. 46 p. (Relatório de referência do primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa).

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. 434 p.

PAIXÃO, F. A. **Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de alternativas de uso de um povoamento de eucalipto**. 2004. 50 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

PIRES, J. M. **Uso do Lidar (*Light Detection and Ranging*) para estimação da altura de árvores em povoamentos de eucalipto**. 2005. 39 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

REIS, M. G. F. ; REIS, G. G. ; VALENTE, O. F. Potencial de seqüestro de carbono pelas florestas brasileiras. **Ação Ambiental**, Viçosa, v. 17, n. 21, p. 20-22, dez./jan. 2001.

REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; VALENTE, O. F.; FERNANDES, H. A. C. Seqüestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL. Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 155-195.

REZENDE, A. V. O estoque de carbono no cerrado: um estudo de caso. In: SANQUETTA, C. R. (Ed). **As florestas e o carbono**. Curitiba, PR, 2002. p. 175-190.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa: UFV, 2001. 389 p.

ROCHA, M. T. O aquecimento global e os instrumentos de mercado para a solução do problema. In: SANQUETTA, C. R. (Ed). **As florestas e o carbono**. Curitiba, PR, 2002. p. 1-34.

SALATI, E. Sumário executivo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO x SEQUESTRO DE CO₂ – UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL. Rio de Janeiro, 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 13-37.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. (Ed). **As florestas e o carbono**. Curitiba, PR. 2002. p. 119-140.

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

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F. Estoque de carbono em florestas de *Pinus taeda* L. e *Acácia mearnsii* Wild. plantadas do estado do Rio Grande do Sul – Brasil. In: SANQUETTA, C. R. (Ed). **As florestas e o carbono**. Curitiba, PR. 2002. p. 141-152.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. Oportunidades para o setor florestal brasileiro com o advento do mercado de créditos de carbono. **Ação Ambiental**, Viçosa, v. 17, n. 21, p. 14-15, dez./jan. 2001

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia florestal**. Viçosa: UFV, 2002. 178 p.

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

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GORGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 29, n. 5, p. 711-718, 2005.

TSUKAMOTO FILHO, A. A. **Fixação de carbono em um sistema agroflorestal com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais**. 2003. 98 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

VITAL, B. R.; CAMPOS, J. C. C.; RIBEIRO, J. C.; DELLA LUCIA, R. M.; TORQUATRO, M. C. **Tabelas de peso seco para algumas espécies de eucalipto**. Viçosa: SIF, 1985. 29 p. (Boletim Técnico SIF, 1).

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. Fixação de carbono em floresta ombrófila mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R. (Ed). **As florestas e o carbono**. Curitiba, PR, 2002. p. 153-173.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. O papel do sensoriamento remoto nos estudos de carbono. In: SANQUETTA, C. R. (Ed). **As florestas e o carbono**. Curitiba, PR, 2002. p. 215-235.

YU, C. M. Caracterização e tipologia dos projetos de seqüestro de carbono no Brasil. In: SANQUETTA, C. R. (Ed). **As florestas e o carbono**. Curitiba, PR, 2002. p. 59-87.