



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

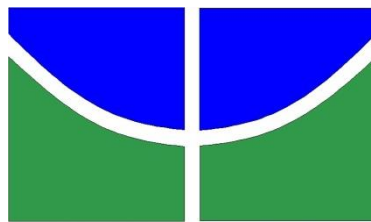
**MODELAGEM EM NÍVEL DE POVOAMENTO TOTAL E
DETERMINAÇÃO DA IDADE ÓTIMA DE CORTE PARA EUCALIPTO**

Alex Ribeiro de Castro

Brasília, 14 de agosto de 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

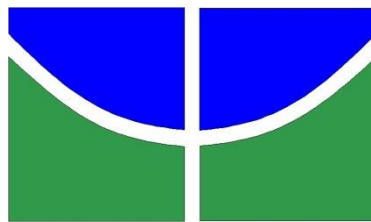
**MODELAGEM EM NÍVEL DE POVOAMENTO TOTAL E
DETERMINAÇÃO DA IDADE ÓTIMA DE CORTE PARA EUCALIPTO**

Alex Ribeiro de Castro

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza

Brasília-DF, 14 de agosto de 2024



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento de Engenharia Florestal – EFL

MODELAGEM EM NÍVEL DE POVOAMENTO TOTAL E DETERMINAÇÃO DA IDADE ÓTIMA DE CORTE PARA EUCALIPTO

Estudante: Alex Ribeiro de Castro

Matrícula: 19/0083433

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza

Menção: SS

Prof. Dr. Álvaro Nogueira de Souza
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Orientador (EFL)

Prof. Dr. Eder Pereira Miguel
Universidade de Brasília – UnB
Membro da Banca

Profa. Dra. Máisa Santos Joaquim
Universidade de Brasília – UnB
Membro da Banca

Brasília-DF, 14 de agosto de 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO, ALEX RIBEIRO

MODELAGEM EM NÍVEL DE POVOAMENTO TOTAL E DETERMINAÇÃO DA IDADE ÓTIMA DE CORTE PARA EUCALIPTO.

51 p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Engenheiro(a), Engenharia Florestal, 2024).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Curva Guia

2. Produtividade Florestal

3. Rotação Econômica

4. Modelo de Crescimento

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRO, A. R. (2024). **MODELAGEM EM NÍVEL DE POVOAMENTO TOTAL E DETERMINAÇÃO DA IDADE ÓTIMA DE CORTE PARA EUCALIPTO**. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 51 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alex Ribeiro de Castro

TÍTULO: *Modelagem em nível de povoamento total e determinação da idade ótima de corte para Eucalipto.*

GRAU: Engenheiro Florestal

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alex Ribeiro de Castro

alexribeirocastrobsb@gmail.com

A minha mãe, Altiva Ribeiro de Castro e ao meu pai, Antonio Santana de Castro, os heróis silenciosos por trás da minha jornada. Suas palavras de sabedoria, e seu amor infinito foram os alicerces sobre os quais construí cada conquista, dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me proporcionado a realização deste trabalho, me dando força, saúde e dedicação.

Aos meus pais, Altiva Ribeiro de Castro e Antonio Santana de Castro, por tudo, principalmente por terem me dado a vida, e me apoiarem em minhas decisões.

A minha irmã, Adriana Ribeiro de Castro, pelo companheirismo e por acreditar no meu potencial, mesmo nos momentos mais desafiadores.

A minha família que eu amo, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha namorada, Camila dos Santos Alves, pelo amor, paciência e compreensão durante toda a minha jornada acadêmica.

Ao meu grande amigo do curso, Kennedy Nunes Oliveira, pelo apoio e pelas muitas horas de estudo e discussões que nos ajudaram a crescer juntos ao longo desta jornada acadêmica.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília. Pelo ensino de qualidade e pela dedicação em compartilhar seus conhecimentos, contribuindo para a minha formação profissional e pessoal.

Ao meu orientador, Dr. Álvaro Nogueira de Souza, pela orientação, conselhos valiosos e pelo compartilhamento de seu vasto conhecimento. Agradeço por todas as horas dedicadas, pelas correções e sugestões que tornaram este trabalho possível.

À professora Dra. Maísa Santos Joaquim e ao professor Dr. Eder Pereira Miguel, por aceitarem participar da banca deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um de vocês, o meu muito obrigado!

“Os rios não bebem sua própria água; as árvores não comem seus próprios frutos. O sol não brilha para si mesmo; e as flores não espalham sua fragrância para si. Viver para os outros é uma regra da natureza. A vida é boa quando você está feliz; mas a vida é muito melhor quando os outros estão felizes por sua causa.”. (Papa Francisco)

RESUMO

Castro, Alex Ribeiro (CASTRO, A. R.) **MODELAGEM EM NÍVEL DE POVOAMENTO TOTAL E DETERMINAÇÃO DA IDADE ÓTIMA DE CORTE PARA EUCALIPTO.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

O objetivo deste trabalho foi Modelar em Nível de Povoamento Total (MPT) para determinar a rotação ótima de corte de um povoamento clonal de eucalipto, visando a melhor eficiência produtiva, econômica e financeira. Para alcançar esse objetivo, o estudo estabelece métodos para determinar a rotação silvicultural, avaliando curvas de crescimento para encontrar a idade ótima de rotação com base na produtividade máxima; analisar a rotação econômica considerando custos e benefícios para identificar a rotação que maximiza o lucro líquido, e calcular a rotação financeira utilizando o Benefício Periódico Equivalente (BPE) para diferentes ciclos de rotação. O povoamento estudado é composto por clones de *Eucalyptus urophylla*, plantados em janeiro de 2015 em espaçamento 3 x 2 m, totalizando 1500ha. Foram lançadas 30 parcelas permanentes, 1 a cada talhão de 50ha, remedidas nos anos 2019, 2020, 2021 e 2022. Com base nos levantamentos dos inventários florestais contínuos, foi realizado a classificação de Sítio pelo método da Curva-Guia, levando em consideração a altura dominante (Hdom) segundo Assmann (1970) e idade índice ou de referência igual a 7 anos. Posteriormente, modelou-se o crescimento e a produção em nível de povoamento total (MPT) para determinação das rotações silviculturais, econômicas e financeiras por classe de Sítio encontrada. Com base nos resultados deste trabalho, foram encontradas três classes de Sítio, sendo a classe I mais produtiva com Índice de Sítio (IS) igual a 30. Em termos de produção, o Sítio I teve 350.57, seguido do Sítio II com 343.52 e o último Sítio com uma produção de 311.80 metros cúbicos. Na rotação financeira, os critérios foram analisados para diferentes idades de rotação. No ano de corte determinado pelo BPE, retornou um valor de R\$ 2,678.68 para o Sítio I, R\$ 1,223.47 para o Sítio II e R\$ 1,007.67 para o Sítio III. Acompanhado pela Taxa interna de Retorno Modificada de 24.16%, 14.72% e 12.98% para os Sítios I, II e III respectivamente. A integração de técnicas avançadas de modelagem com análises econômicas robustas promove uma gestão florestal eficiente, maximizando o aproveitamento dos recursos naturais e assegurando o desenvolvimento sustentável das indústrias florestais. A definição da rotação ótima, seja silvicultural, econômica ou financeira, é crucial para a sustentabilidade e rentabilidade dos projetos florestais. Foi realizada a análise de sensibilidade, com cenários de 20%, para mais e para menos, na produção, possibilitando verificar alterações nos BPE.

Palavras-chave: Curva Guia; Produtividade Florestal; Rotação Econômica; Modelo de Crescimento

ABSTRACT

Castro, Alex Ribeiro (CASTRO, A. R.) **TOTAL STAND-LEVEL MODELING AND DETERMINATION OF OPTIMAL HARVEST AGE FOR EUCALYPTUS**. Monograph (Forest Engineering Degree) – University of Brasília, Brasília, DF.

The objective of this study was to model at the Total Stand Level (TSL) to determine the optimal harvest rotation of a clonal eucalyptus stand, aiming for the best productive, economic, and financial efficiency. To achieve this goal, the study establishes methods to determine the silvicultural rotation by evaluating growth curves to find the optimal rotation age based on maximum productivity; analyze the economic rotation considering costs and benefits to identify the rotation that maximizes net profit; and calculate the financial rotation using the Equivalent Periodic Benefit (EPB) for different rotation cycles. The stand studied consists of *Eucalyptus urophylla* clones, planted in January 2015 with a 3 x 2 m spacing, totaling 1500 ha. Thirty permanent plots were established, one in each 50 ha plot, remeasured in 2019, 2020, 2021, and 2022. Based on continuous forest inventory surveys, site classification was performed using the Guide Curve method, taking into account the dominant height (Hdom) according to Assmann (1970) and a reference age of 7 years. Subsequently, growth and yield were modeled at the total stand level (TSL) to determine the silvicultural, economic, and financial rotations by the site classes found. Based on the results of this study, three site classes were identified, with class I being the most productive, with a Site Index (SI) of 30. In terms of yield, Site I had 350.57 cubic meters, followed by Site II with 343.52 and Site III with 311.80 cubic meters. For financial rotation, the criteria were analyzed for different rotation ages. In the year of harvest determined by the EPB, the values returned were R\$ 2,678.68 for Site I, R\$ 1,223.47 for Site II, and R\$ 1,007.67 for Site III. Accompanied by the Modified Internal Rate of Return of 24.16%, 14.72%, and 12.98% for Sites I, II, and III, respectively. The integration of advanced modeling techniques with robust economic analyses promotes efficient forest management, maximizing the use of natural resources and ensuring the sustainable development of forest industries. Defining the optimal rotation, whether silvicultural, economic, or financial, is crucial for the sustainability and profitability of forestry projects. A sensitivity analysis was carried out, with scenarios of $\pm 20\%$ in yield, allowing for verification of changes in the EPB.

Keywords: Guide Curve; Forest Productivity; Economic Rotation; Growth Model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de produção e as fases de uma floresta para definição da idade técnica de corte. Fonte: Campos e Leite (2017).	18
Figura 2. Gráfico de dispersão da distribuição residual (%) em função da altura observada, para os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022.	31
Figura 3. Gráfico de dispersão da distribuição residual (%) em função da altura dominante.	32
Figura 4. Limite das classes de sítio florestal, classificadas segundo o Logistic Model pelo método da Curva-Guia para o povoamento de <i>Eucalyptus urophylla</i>	34
Figura 5. Disposição dos resíduos (%) em função do volume observado na cubagem para os dois modelos volumétricos ajustados.	35
Figura 6. Gráfico de dispersão da distribuição residual (%) em função do volume observado para o modelo de Clutter.	36
Figura 7. Cruzamento do Incremento Corrente Anual (ICA) com o Incremento Médio Anual (IMA) para definição da idade de rotação técnica para os índices de sítio (S) igual a 30, 26 e 22	38
Figura 8. Taxa de Crescimento do Povoamento Florestal (Duerr).....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados de custos para definir a rotação econômica e financeira.	21
Tabela 2. Modelos Hipsométricos.	22
Tabela 3. Modelos Volumétricos.....	24
Tabela 4. Parâmetros e critérios de precisão dos modelos ajustados por ano.	29
Tabela 5. Parâmetros de precisão do modelo de Logistic Model para cálculo das Alturas Dominantes.....	32
Tabela 6. Valores encontrados para as informações das classes de sítio na idade de referência de 7 anos.	33
Tabela 7. Classes de sítio segundo o Logistic Model para a Idade de Referência (I_{ref}) igual a 7 anos, a partir do método da Curva-Guia.....	33
Tabela 8. Estatísticas de precisão dos modelos volumétricos ajustados.	34
Tabela 9. Estatísticas de precisão do modelo de Clutter ajustado.	36
Tabela 10. Valores dos incrementos anuais e produção volumétrica ($m^3 ha^{-1}$) por classe de sítio para determinação da rotação silvicultural.	37
Tabela 11. Valores encontrados dos critérios para a definição da rotação financeira.	40
Tabela 12. Valores encontrados dos critérios para a definição da rotação econômica.....	42
Tabela 13. Análise de Sensibilidade.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
SNIF	Sistema Nacional de Informações Florestais
HDOM	Altura Dominante
MPT	Modelagem em Nível de Povoamento Total
IS	Índice de Sítio
TXC	Taxa de Crescimento

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Rotação Silvicultural	17
3.2 Rotação Financeira	18
3.3 Rotação Econômica	20
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Material	21
4.2 Métodos	22
4.2.1 Ajuste Hipsométrico	22
4.2.2 Classificação do Sítio Florestal	23
4.2.3 Cubagem Rigorosa.....	23
4.2.4 Modelagem a Nível de Povoamento Total (MPT)	24
4.2.5 Escolha do Melhor Modelo de Altura e Volume	25
4.2.6 Rotação Silvicultural	26
4.2.7 Rotação Financeira	27
4.2.8 Rotação Econômica	28
4.2.9 Análise de Sensibilidade	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Ajuste dos Modelos Hipsométricos.....	29
5.2 Classificação de Sítio	32
5.3 Ajuste dos Modelos Volumétricos	34
5.4 Modelagem em Nível de Povoamento Total (MPT)	36
5.5 Rotação Silvicultural	37
5.6 Rotação Financeira	39
5.7 Rotação Econômica	42
5.8 Análise de Sensibilidade	44
6 CONCLUSÃO	45
7 REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

As florestas têm uma imensa ligação com os recursos que sustentam a vida no nosso planeta, exercendo uma influência direta sobre o ambiente e o clima, além de elevada importância para o mercado e economia. No mundo, elas ocupam 4 bilhões de hectares (ha), sendo 3,74 bilhões de ha de nativa (93% do total), enquanto que de áreas plantadas são 291 milhões de ha (7% do total) (ABIMCI, 2022).

No cenário nacional, a extensão global de áreas plantadas em 2021 foi de 9,93 milhões de ha, apresentando um crescimento de 1,93% em relação ao ano anterior. Dentro desse montante, as áreas destinadas ao cultivo de espécies do gênero *Eucalyptus* totalizaram 7,53 milhões de ha (IBÁ, 2022), tendo uma grande concentração nas regiões de Minas Gerais (27%), Mato Grosso do Sul (15,3%) e São Paulo (13,2%), segundo dados do SNIF (2022).

O potencial produtivo dos plantios de eucalipto no Brasil é superior ao de outras regiões do mundo, apresentando grande competitividade no mercado de produtos florestais, por ter boas características edafoclimáticas. A produtividade média no plantio de eucalipto tem evoluído bastante ao longo dos anos, em 1970 era 10 m³/ha/ano e, em 2021 foi de 38,9 m³/ha/ano (IBÁ, 2022). A colheita de madeira da maior parte dos plantios florestais comerciais de *Eucalyptus sp.* ocorre em torno dos sete anos. Além da produção florestal comercial ter uma boa produtividade no Brasil, também contribui para a geração de empregos na econômica nacional. Foram mais de 668 mil empregos diretos gerados pelo setor em 2013, segundo Moreira e Oliveira (2017).

Considerando que o solo não é uniforme, é fundamental identificar áreas com distintos níveis de produtividade, sendo esses identificados como "manchas de produtividade". Com base no que foi apresentado, a classificação da capacidade produtiva do local é de suma importância, uma vez que é uma variável de grande relevância e integra os modelos de crescimento e produção florestal. O método mais utilizado para essa classificação de sítio é a Curva-Guia, o que resulta exclusivamente em curvas anamórficas, que são aquelas em que a tendência do crescimento é a mesma para todos os locais. A partir de uma equação representativa dessa curva, uma equação de índices de sítio é formada no momento em que a idade do povoamento se equipara à idade de referência, e a altura dominante (Hdom) corresponde ao índice de sítio (IS) (Figueiredo, 2005). Resumidamente, o índice de sítio (IS) é calculado como a média das alturas dominantes das 100 árvores de maior diâmetro em uma área de um hectare, conforme definido por (Assmann, 1970 apud. Schuchovski, 2019), numa idade de referência determinada.

Os modelos de povoamento total (MPT) procuram prever o crescimento e/ou a produção com base em características do povoamento, como idade, área basal e índice de local (Campos e Leite, 2013). Ao simular o desenvolvimento de um povoamento, o MPT requer um conjunto relativamente reduzido de informações, mas essas informações geram uma compreensão mais abrangente sobre as projeções futuras do povoamento (Vanclay, 1994). A estimativa da produção em plantações florestais é realizada por meio de modelos que replicam a dinâmica natural e projetam a produção ao longo do tempo, levando em conta diversas alternativas de exploração (Vanclay, 1994). Para maximizar o aproveitamento do potencial dessas florestas, é fundamental utilizar modelos ou técnicas que forneçam previsões sobre o crescimento e a produção, estabelecendo assim uma estrutura eficaz para a gestão dos povoamentos que são destinados às indústrias florestais. Segundo Campos e Leite (2013) existem diversos modelos que vão de acordo com o nível de detalhamento desejado, podendo ser classificados em nível de povoamento total (MPT), nível de distribuição diamétrica (MDD) e árvores individuais (MAI).

O crescimento de uma árvore é definido como o aumento de suas dimensões em um período de tempo, enquanto que o crescimento da floresta diz respeito as mudanças ocorridas na estrutura neste período. Mudanças como o ingresso de novas plantas na floresta, a mortalidade das árvores e outras plantas, o corte ou desbaste seletivo. Portanto, o crescimento florestal não se refere apenas ao aumento em tamanho das árvores, mas também às mudanças na composição e na estrutura vertical e horizontal da floresta. A idade ótima de corte de um povoamento florestal pode ser definida em termos volumétricos ou econômicos. Para determinar do ponto de vista técnico ou silvicultural, dois indicadores de crescimento da floresta devem ser considerados, sendo eles: o Incremento corrente anual (ICA), que diz respeito ao quanto a floresta cresceu em volume no último ano, e o Incremento médio anual (IMA), vai retornar o crescimento médio até a idade desejada. Assim, a idade ótima de corte é atingida quando o valor do IMA iguala-se ao valor do ICA.

Já do ponto de vista econômico e financeiro Lopes (1990) destaca que é indispensável a utilização de critérios econômicos na área florestal para tomada de decisão em relação ao projeto e/ou alternativa de manejo a serem adotados. Assim, os principais critérios utilizados para análise da viabilidade econômica são: valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), taxa interna de retorno modificada (MTIR), valor esperado da terra (VET), benefício periódico equivalente (BPE) (Rezende e Oliveira, 2013).

Compreender as dinâmicas e características das florestas, especialmente aquelas destinadas ao cultivo comercial como o eucalipto, é essencial para maximizar seu potencial produtivo e econômico. A análise da rotação silvicultural, que considera indicadores de crescimento como o Incremento Corrente Anual (ICA) e o Incremento Médio Anual (IMA), permite determinar a idade ótima de corte de um povoamento florestal, equilibrando a produção volumétrica ao longo do tempo. Além disso, a rotação econômica e financeira envolve a aplicação de critérios econômicos, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Benefício Periódico Equivalente (BPE), para avaliar a viabilidade e a rentabilidade dos projetos florestais. Dessa forma, ao integrar técnicas avançadas de modelagem com análises econômicas robustas, é possível promover uma gestão florestal eficiente, que maximiza o aproveitamento dos recursos naturais e garante o desenvolvimento sustentável das indústrias florestais.

A análise de sensibilidade em um plantio florestal avalia como mudanças nas variáveis, tais como custos, preços da madeira, taxa de crescimento das árvores, taxa de juros, vão afetar a viabilidade econômica do projeto. Com isso, a análise busca quantificar o impacto de uma variação específica em um ou mais fatores do projeto que possam influenciar o resultado final. Assim, é possível examinar como cada variável do projeto afeta a rentabilidade dos resultados previstos (Ponciano et al., 2004).

Uma vez determinada a sensibilidade, é possível avaliar os riscos associados, como um possível aumento no custo da matéria-prima ou a diminuição no preço do produto (Buarque, 1991 apud. Silva, 2021). Dessa forma, ao identificar os fatores mais relevantes, o responsável pode tomar decisões mais acertadas e prevenir erros que possam causar significativas perdas financeiras (Peres et al., 2009).

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi Modelar em Nível de Povoamento Total (MPT) para determinar a rotação ótima de corte de um povoamento clonal de eucalipto, visando a melhor eficiência produtiva, econômica e financeira.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Rotação Silvicultural

A idade em que as curvas de incremento (IMA e ICA) se cruzam é considerada a ideal para o corte raso, chamada de idade ótima de corte, pois representa a maior eficiência na produção em volume. Essa idade é definida como a rotação técnica, baseada na produtividade média (Scolforo, 1998; Campos e Leite, 2013). Existem diversas maneiras de expressar o crescimento ou incremento de uma árvore ou povoamento florestal. Com frequência se destacam os seguintes tipos:

- O crescimento médio anual para um período de dois anos ou mais denomina-se incremento periódico anual (IPA). Frequentemente usado no lugar do incremento corrente anual (ICA) em florestas de clima temperado. Sendo encontrado através da diferença das medidas no início e no final do período.
- Quando este período é de um ano, o aumento então é chamado de incremento corrente anual (ICA), e para obtenção dos dados segue o mesmo princípio descrito acima (diferença das medidas no início e final dos anos de crescimento).
- Se essa diferença não for dividida pelo período (número de anos), denomina-se então incremento periódico (IP), que nada mais é do que a produção ao final de um período menos a produção no início deste período.
- O incremento médio anual (IMA) para qualquer idade é calculado dividindo-se o tamanho acumulado pela idade correspondente. Esse valor representa a média anual de crescimento, obtida a partir da média da produção desde a idade 0 até uma determinada idade.

Frequentemente, a curva de ICA e IMA são usadas. Sendo ICA a primeira derivada da curva de produção, isto é, ela representa o aumento da variável analisada dentro dos intervalos fixos (Figueiredo Filho *et al.*, 2017). Nesta, é definida as três fases de crescimento, que são a fase juvenil, maturidade e senescência. E também possui um ponto de máximo que coincide com a idade em que ocorre o ponto de inflexão na curva de produção (Imanã Encinas, Silva e Pinto, 2005).

A curva de IMA é a média da curva de produção, e decresce mais suavemente que a curva de ICA (Figueiredo Filho *et al.*, 2017). É parecida com a curva de ICA, e quando atinge o seu máximo é exatamente quando as duas se cruzam. O máximo IMA é o ponto que define a máxima média de incremento da produção que determinada espécie pode alcançar. Esse ponto coincide com o ponto onde uma tangente, que parte da origem (tangente máxima), toca a

curva de produção (Scolforo, 1998). Dessa maneira, a relação entre as curvas é que, ICA é maior que IMA, e o IMA vai aumentando até que cruze a linha do ICA e se torna maior, e então a curva do IMA entra em decréscimo.

A forma dessas curvas depende da espécie, do espaçamento inicial do plantio, da capacidade produtiva do local e das práticas silviculturais adotadas após o plantio, especialmente o desbaste. Pode verificar (Figura 1) que, quando a produção atinge seu máximo, o Incremento Corrente Anual (ICA) é igual a zero (Campos e Leite 2017).

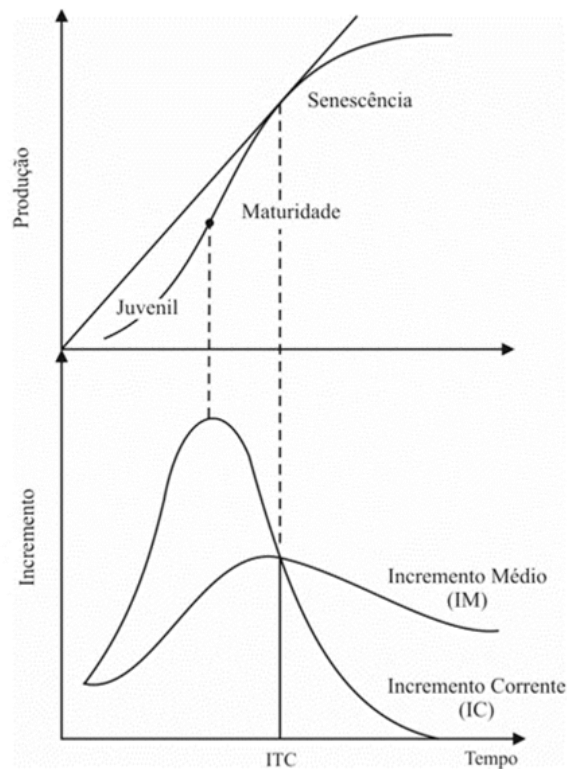


Figura 1. Curva de produção e as fases de uma floresta para definição da idade técnica de corte.
Fonte: Campos e Leite (2017).

3.2 Rotação Financeira

A análise financeira está voltada para o fluxo financeiro do projeto, distinguindo-se o capital próprio e de terceiros, a fim de determinar a capacidade financeira do projeto e o retorno do capital investido. A Análise Financeira deverá ser realizada sob qualquer ponto de vista necessário para se estabelecer a viabilidade financeira do projeto (Góes, 2019).

A determinação do regime de manejo e da rotação de um povoamento é uma das etapas mais cruciais no manejo e planejamento florestal. Isso se deve não só ao objetivo principal de maximização dos lucros, mas também aos elevados valores de investimento envolvidos em tais projetos (Resende *et al.*, 2004). Realizar o corte da floresta fora da sua idade

economicamente ideal pode aumentar os custos de produção e/ou reduzir as receitas, resultando na perda do máximo retorno sobre o investimento.

Dentre as técnicas financeiras que são utilizadas para a determinação da rotação está a análise do Fluxo de Caixa, que é representada por métodos que consideram a variação do capital ao longo do tempo (Josino, 2018). As ferramentas utilizadas nesse tipo de análise podem ser: o Valor Presente Líquido (VPL); Valor Presente Líquido Para Horizontes Infinitos (VPL_{∞}); Valor Esperado da Terra (VET); Taxa Interna de Retorno (TIR); Benefício Periódico Equivalente (BPE) e Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR).

Os critérios que foram citados são de suma importância para avaliação de projetos, porém, se destacam o Benefício Periódico Equivalente (BPE) e a Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR) (Silva, Jacovine e Valverde, 2005; Souza, 2016).

O Benefício Periódico Equivalente (BPE) representa a parcela constante e periódica necessária para igualar o valor presente líquido (VPL) de uma opção de investimento ao longo de sua vida útil (Cordeiro *et al.*, 2017) Segundo Dias (2000), o BPE é o método mais adequado para comparar projetos com diferentes horizontes de planejamento, pois expressa os custos ou receitas em uma base temporal. Rezende e Oliveira (2013) argumentam que quanto maior o Benefício Periódico Equivalente, melhor é o projeto. No entanto, os retornos de um projeto de menor duração pode ser reinvestidos até o término da vida útil de um projeto mais longo, quando existem diferentes horizontes temporais. Os autores citados também destacam que o cálculo do BPE é simples e direto, sendo a abordagem preferida. Um projeto será considerado viável se apresentar um BPE positivo, indicando que as receitas excedem os custos.

A Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR) é um indicador melhor da taxa de retorno de longo prazo, de um projeto de investimento, desde que convencional, por levar em conta a realidade do mercado. Do ponto de vista de Kassai *et al.* (1999), a MTIR é uma versão melhorada da TIR, pois descarta os problemas decorrentes das diversas raízes, bem como das taxas divergentes de financiamento e refinanciamento, indicando assim a verdadeira taxa interna de retorno de um projeto. A MTIR é acima da TIR como indicador da “verdadeira taxa de retorno de um projeto” (Brigham e Houston, 1999 apud. Dorneles 2007).

Os custos envolvidos nas atividades florestais se dividem em: implantação, manutenção, colheita, reforma e administração (Silva, Jacovine e Valverde, 2005; Souza, 2016). Sendo os custos de implantação aqueles que ocorre até o primeiro ano do projeto, tais como: Supressão, preparo do solo, alinhamento, marcação, covoamento, combate de formigas e cupins,

preparação da muda e plantio. E os custos de manutenção são aqueles que ocorrem até o início da colheita, como capinas ou roçadas, desrama e desbastes. Já os custos de colheita, são aqueles relacionados com as operações de abate, extração, empilhamento, carga, transporte e descarga da madeira no pátio da fábrica. Sendo as operações normalmente são semimecanizadas ou mecanizadas (Fiedler, 2020).

3.3 Rotação Econômica

A rotação financeira e a rotação econômica são conceitos utilizados na silvicultura e em outras áreas para determinar o melhor momento de realizar o corte de árvores ou a substituição de culturas, mas eles se baseiam em critérios diferentes. A rotação financeira é o período de tempo que maximiza o valor presente líquido (VPL) ou o retorno financeiro de um investimento (Cordeiro *et al.*, 2009). Focando na maximização dos ganhos financeiros descontados ao valor presente, considerando o fluxo de caixa ao longo do tempo. Enquanto que a rotação econômica é o período de tempo que maximiza a produtividade econômica média ao longo do tempo, não necessariamente focando nos fluxos de caixa descontados (Ângelo *et al.*, 2009).

O modelo desenvolvido por Duerr, considera que a maturidade financeira dos povoamentos ocorre quando, a taxa de crescimento do valor da produção florestal (TXC), se equipara com a taxa alternativa que o proprietário florestal tem a sua disposição (Taxa Mínima de Atratividade – TMA) (Duerr *et al.*, 1956). A Taxa de Crescimento (TXC) é entendida como a taxa média de crescimento de um investimento.

O retorno exigido pelos fornecedores de capital, ou o custo de capital, pode ser utilizado como a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) nas análises de projetos de investimento (Ferreira, 2021). É uma taxa de juros, que ao se fazer um investimento o investidor espera um retorno pelo menos igual a essa taxa. A TMA é única para cada investidor e não existe fórmula matemática para calculá-la, pois ela pode variar com o tempo. Portanto, para um projeto ser financeiramente viável:

- A Taxa de Crescimento (TXC) tem que ser igual a Taxa Mínima de Atratividade, para fazer a corte do povoamento.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O *Eucalyptus urophylla* apresenta rápido crescimento, média a alta densidade de madeira. A maior plantação desta espécie no mundo é localizada no Brasil. Devido a elevada densidade de madeira, *E. urophylla* é recomendada para a indústria energética na produção de carvão e de construção por apresentar alta resistência, sendo utilizada para produzir móveis, muros e quebra-ventos (CROPLIFE, 2020).

A espécie é uma das mais cultivada de *Eucalyptus sp.*, por ter um bom desenvolvimento e ser tolerante tanto ao fungo que causa o cancro do eucalipto (*Cryphonectria cubensis*) como também resistência a seca do ponteiro (Scanavaca, 2004).

As equações foram ajustadas para um povoamento de uma Empresa Florestal S.A., situada ao Sudoeste do estado do Goiás. Com clima tipo Aw, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (36 48), é caracterizado por temperaturas elevadas durante todo o ano, com uma estação seca bem definida no inverno e uma estação chuvosa intensa no verão (Setzer, 1966).

4.1 Material

Os dados foram obtidos através medição de parcelas permanentes em um plantio composto por clones de *Eucalyptus urophylla*, plantados em janeiro de 2015 em espaçamento 3 x 2 m, isto é, 600m² ou 0,06 hectare. Apresentando uma densidade inicial de 1666 indivíduos/ha, destinados a biomassa para geração de energia. Foram lançadas 30 parcelas permanentes, 1 a cada talhão de 50 hectares, remedidas nos anos 2019, 2020, 2021 e 2022. Totalizando um povoamento de área igual a 1500ha.

Para a análise financeira foram utilizados dados de empresas florestais que atuam próximas da região de estudo, como o de Pedroso Filho et al. (2018). Os valores foram corrigidos com as taxas de inflação para o ano atual pelo site DadosMundiais (2024), e convertidos para reais (R\$), multiplicando por 5,7 que é o valor atual do dólar (Tabela 1).

Tabela 1. Dados de custos para definir a rotação econômica e financeira.

Item de custo	Ano de ocorrência	Valor	Unidade
Plantio	0	R\$ 4,696.57	ha
Tratos culturais	1	R\$ 514.48	ha/ano
Tratos culturais	2	R\$ 514.48	ha/ano
Tratos culturais	3	R\$ 514.48	ha/ano

Continua...

Continua...

Item de custo	Ano de ocorrência	Valor	Unidade
Tratos culturais	4 – 14	R\$ 411.60	ha/ano
Preço da terra	-	R\$ 1,322.97	ha
Preço de mercado	-	R\$ 110.00	m ³
Taxa mínima de atratividade	-	6	% a.a
Taxa de reinvestimento	-	11	% a.a

Onde: ha: hectare; m³: metro cúbico; % a.a: porcentagem ao ano.

4.2 Métodos

4.2.1 Ajuste Hipsométrico

As relações hipsométricas são de extrema relevância, já que não é necessário conhecer todas as alturas do povoamento, sendo necessário apenas o conhecimento de algumas alturas em cada parcela inventariada. Desta forma, com as árvores que possuem altura coletada em campo, é possível ajustar modelos hipsométricos para estimar as demais árvores que não possuem altura. Em cada ano de inventário conduzido, ocorreu um ajuste de altura junto aos dados correspondentes. Os modelos de altura que foram ajustados estão na Tabela 2. Para o modelo não linear (Curtis), assim como o modelo volumétrico subsequente de Schumacher-Hall, é preciso empregar o antilogaritmo para obter a forma real. Esse "antilog" também é referido como Fator de Correção de Meyer, ou simplesmente F_{Meyer} , e sua expressão é dada pela equação 1.

Tabela 2. Modelos Hipsométricos.

Autor	Modelo
Curtis	$\ln H = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{DAP} + \varepsilon$
Trorey	$H = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \varepsilon$

Onde: Ln: Logaritmo neperiano; β_i : Coeficientes a serem estimados; DAP: Diâmetro na altura do peito (cm); H: Altura total; ε : Erro associado ao modelo.

$$F_{Meyer} = e^{0,5 \cdot QMR} \quad (1)$$

Onde:

e: exponencial;

QMR: Quadrado médio do resíduo.

4.2.2 Classificação do Sítio Florestal

O crescimento e a produção de uma floresta estão condicionados à idade, à capacidade produtiva, à eficiência na utilização do potencial do local e às intervenções silviculturais realizadas (Campos e Leite, 2013). A avaliação da capacidade produtiva do local, pode ser definida de 3 formas, porém, no presente contexto, adotou-se o método da Curva-Guia, fundamentado na relação entre a altura dominante conforme Assmann e a idade do povoamento. Isso se deve ao fato de que, para a maioria das espécies, áreas mais produtivas apresentam uma correlação entre a altura dominante e a capacidade produtiva do local. Lembrando que Curva-Guia, gera somente gráficos anamórficos, que são aqueles em que a tendência de crescimento em altura é igual para todos os locais, tendo como fonte de dados para construção de curvas de índices de local as parcelas permanentes, parcelas temporárias e anatomia de tronco.

O índice de sítio (IS), apesar de ser facilmente confundido com sítio florestal, possuem diferença. Sendo o sítio florestal a capacidade que uma área tem para o desenvolvimento de árvores, enquanto que índice de sítio é um valor numérico expresso pela média das árvores dominantes em uma idade de referência, que é comumente uma idade próxima a idade de rotação silvicultural do povoamento, por volta dos 7 anos. No ajuste do método da Curva-Guia, utilizou-se um software *Curve Expert 1.3*, que retornou melhor modelo Logistic Model (equação 2) para estimativa da capacidade produtiva (Hyams, 2009).

$$y = \frac{a}{1+b*\exp(-c*x)} \quad (2)$$

Onde:

y = Variável altura (m);

a,b,c = Coeficientes a serem ajustados;

exp = Exponencial;

x = Variável idade (anos) (m);

4.2.3 Cubagem Rigorosa

A cubagem rigorosa é entendida como as medidas de vários diâmetros ao longo do tronco da árvore, sendo estes a 0,30; 1,30; 3,30; 5,30 e assim sucessivamente, de 2 em 2 metros (Gomes, 1957 apud. Cabacinha, 2003). E para tal, Machado e Figueiredo Filho (2006), destacam Newton, Smailan e Huber como sendo os principais métodos para cubagem

rigorosa. Com esse propósito, foram cubadas 81 árvores, e os volumes foram obtidos através da fórmula de Smailan (equação 3), acrescido ao volume de ponta ($V_{total} = V + V_p$), equação 4. E ao final, foram ajustados modelos volumétricos (Tabela 3).

$$V = \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) L \quad (3)$$

Onde:

V = Volume;

g_i = Área seccional;

L = Comprimento da tora (m)

$$V_p = v_{cone} = \frac{g_c * l_c}{3} \quad (4)$$

Onde:

v_p = Volume de ponta (m^3);

g_c = Área seccional na base do cone (m^2);

l_c = Comprimento da ponta ou do cone (m);

Tabela 3. Modelos Volumétricos

Autor	Modelo
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 H + \varepsilon$
Schumacher-Hall	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP + \beta_2 \ln H + \varepsilon$

Onde: V: Volume; β_i : Coeficientes a serem estimados; DAP: Diâmetro na altura do peito (cm); H: Altura total; Ln: Logaritmo neperiano; ε : Erro associado ao modelo.

4.2.4 Modelagem em Nível de Povoamento Total (MPT)

Para o ajuste da modelagem a nível de povoamento total (MPT), foi utilizado o modelo completo de Clutter (equação 5). Pois esse modelo, permite que o volume futuro seja projetado fixando uma área basal e idade iniciais, e para realizar os ajustes dos coeficientes foi utilizado o Software Microsoft Excel, através da análise de dados e regressão linear.

$$\ln V_2 = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{S} + \beta_2 \frac{1}{I_2} + \beta_3 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \ln G_1 + \beta_4 \left(1 - \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \right) + \beta_5 S \left(1 - \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \right) + \varepsilon \quad (5)$$

Onde:

V_2 = Volume de madeira com casa na idade futura (m^3/ha);

S = Índice de local;

I_1 = Idade atual (anos);

I_2 = Idade futura (anos);

G_1 = Área basal no ano atual;

β_i = Coeficientes do modelo;

\ln = Logaritmo neperiano;

ε = Erro associado ao modelo.

4.2.5 Escolha do Melhor Modelo de Altura e Volume

Para fazer a escolha do melhor modelo que foi ajustado, deve se fazer algumas análises após a regressão. A sequência para essa escolha é listada abaixo:

- Análise do Gráfico de Resíduos: O gráfico é gerado com o erro percentual (%) em relação ao volume ou altura observados. Ao ser representado no gráfico, ele indica a magnitude das variações entre os valores estimados e os valores reais;
- Erro Padrão Absoluto (S_{yx}): Diz respeito ao erro médio absoluto com unidade de medida igual ao da variável dependente (equação 6);
- Erro Padrão Relativo (S_{yx} %): Seguindo o mesmo princípio do ponto anterior, porém expresso em porcentagem (equação 7);
- Coefficiente de Determinação Ajustado (R^2 ajustado): Vai explicar quanto a(s) variável(is) independente(s) está(ão) explicando a variável dependente. Quanto maior R^2 ajustado, melhor é a equação de regressão (equação 8).

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(y_i - y_e)^2}{n-p}} \quad (6)$$

Onde:

S_{yx} = Erro padrão absoluto;

y_i = Variável observada;

y_e = Variável estimada;

n = Número de observações;

p = Número de coeficientes ajustados.

$$S_{yx(\%)} = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} 100 \quad (7)$$

Onde:

$S_{yx(\%)}$ = Erro padrão relativo;

S_{yx} = Erro padrão absoluto;

\bar{Y} = Média da variável observada

$$R^2_{\text{ajustado}} = 1 - \left[\left(\frac{SQR}{SQT} \right) * \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \right] \quad (8)$$

Onde:

R^2_{ajustado} = Coeficiente de determinação Ajustado;

SQR = Soma de quadrado dos Resíduos;

SQT = Soma de Quadrado total

n = Número de observações;

p = Número de coeficientes ajustados

4.2.6 Rotação Silvicultural

O crescimento é o resultado da interação entre dois elementos. Por um lado, há um componente positivo que reflete a expansão de um organismo, enquanto pelo lado oposto, contém um componente negativo que representa as limitações impostas por fatores externos, como competição e estresse hídrico, e por fatores internos, incluindo mecanismos de autorregulação e envelhecimento (Zeide, 1993).

Desta maneira, o Incremento Corrente Anual (ICA) refere-se à discrepância nas dimensões de uma árvore ou floresta, medidas no final (Y_2) e no início (Y_1) de um ciclo anual de crescimento (equação 9). Enquanto que o Incremento Médio Anual (IMA) refere-se em termos médios, quanto uma floresta cresceu por ano até uma idade (I) qualquer (equação 10).

$$ICA = Y_2 - Y_1 \quad (9)$$

$$IMA = \frac{Y}{I} \quad (10)$$

Portanto, optou-se pelo método de cruzamento do Incremento Corrente Anual (ICA) e do Incremento Médio Anual (IMA) para determinar a idade ótima de corte. Este método permite uma avaliação precisa do ponto em que a produtividade do povoamento é maximizada, garantindo que a colheita seja realizada no momento mais eficiente do ponto de vista volumétrico.

4.2.7 Rotação Financeira

Mediante aos dados fornecidos na Tabela 1, foram calculados os critérios que levam em conta a variação do capital ao longo do tempo. Ressalto que a taxa mínima de atratividade (TMA) foi utilizada de acordo com o crédito de investimento Pronaf do grupo ABC+ do Banco do Brasil, e a Taxa de revestimento foi de acordo o Tesouro Direto Prefixado.

Os métodos mais utilizados na análise de investimentos florestais e em qualquer tipo de investimento de longo prazo, foram utilizados na escolha da rotação financeira (Rodrigues, 2016). Sendo eles:

- Valor Presente Líquido (VPL): É a diferença entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos (equação 11).
- Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR): É a taxa de retorno que faz com que o valor presente das entradas de caixa de um investimento seja igual ao valor presente das saídas de caixa. Quando a MTIR é maior que a taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade, o projeto é considerado atrativo. Por outro lado, se a MTIR for menor que a taxa de desconto, o projeto pode não ser considerado atrativo (equação 12).
- Benefício Periódico Equivalente (BPE): É a parcela periódica e constante necessária ao pagamento de uma quantia igual ao VPL da opção de investimento em análise, ao longo da sua vida útil. O BPE pode ser utilizado para ordenar projetos com diferentes horizontes de planejamento (equação 13).

$$VPL = \sum_{i=1}^n R_j (1 + i)^{-j} - \sum_{i=1}^n C_j (1 + i)^{-j} \quad (11)$$

$$MTIR = \left[\left(\sum_{j=0}^n R_j (1 + i)^j \div \sum_{j=0}^n C_j (1 + d)^{-k} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \times 100 \quad (12)$$

$$BPE = \frac{VPL * i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (13)$$

Onde:

VPL = Valor Presente Líquido;

MTIR = Taxa Interna de Retorno Modificada;

BPE = Benefício Periódico Equivalente;

Cj = Custos ao final do ano j;

Rj = Receita ao final do ano ou do período considerado;

i = Taxa de atratividade do capital (TMA);

n = Rotação, em anos;

j = Período de capitalização referente ao valor futuro das receitas;

d = Taxa de juros do financiamento;

k = Período de desconto referente ao valor presente dos custos.

4.2.8 Rotação Econômica

Este período ótimo é crucial para garantir a sustentabilidade econômica do empreendimento florestal, pois colher antes ou depois da rotação econômica pode resultar em perdas financeiras significativas. A determinação da rotação econômica é geralmente realizada por meio de análises financeiras e técnicas, levando em consideração a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e a Taxa de Crescimento (TXC) que foi obtida com a Equação 14, que influenciam diretamente a viabilidade econômica do projeto florestal (Ângelo *et al.*, 2009).

Considerando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e da Taxa de Crescimento (TXC), foi determinada a idade ótima de corte. Essa abordagem não visa apenas maximizar a produção florestal, mas também assegurar uma gestão financeira do negócio, alinhada com os objetivos de longo prazo da empresa. Uma vez calculado TXC, a taxa obtida é então comparada com a Taxa Mínima de Atratividade estipulada pelo proprietário florestal. O ano que propicia esta igualdade passa a ser a idade ótima de corte. (Berger, 1985).

$$TXC = \left(\left(\frac{P_t}{P_{t-1}} \right) - 1 \right) \times 100 \quad (14)$$

Onde:

TXC = Taxa de crescimento;

P_t = Produção no período t;

P_{t-1} = Produção no período imediatamente anterior ($t - 1$)

4.2.9 Análise de Sensibilidade

Após o cálculo do BPE (Equação 13) para cada sítio, foi realizada a Análise de Sensibilidade, que envolve a modificação de apenas uma variável por vez (Junior *et al.*, 2008). Neste caso, foi ajustado a variável de produção, construindo dois cenários com alterações de 20% para mais e para menos (Bentes-Gama *et al.*, 2005). Sendo este, um tipo de análise de risco, possibilitando a identificação de quais cenários podem se tornar lucrativas com o aumento da produção, tornando-as mais atraentes para a empresa, e quais estão mais vulneráveis a gerar prejuízos em caso de uma queda. Isso leva em conta que as produções estabelecidas para a comercialização dos produtos estão sujeitas às flutuações do mercado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ajuste dos Modelos Hipsométricos

Após os três modelos serem ajustados, sendo o de Curtis e Trorey para cada ano inventariado, foram gerados os resultados conforme a Tabela 4. E a escolha do melhor modelo segue os critérios listados no item 4.2.5.

Tabela 4. Parâmetros e critérios de precisão dos modelos ajustados por ano.

Modelo	Coeficientes	Critérios de Precisão		
		R ² ajustado	Syx (m)	Syx (%)
Curtis				
2019	$\beta_0 = 3.26204496$ $\beta_1 = 4.944067586$ $F_{Meyer} = 1.0019861$	0.64	1.01	6.09
2020	$\beta_0 = 3.536654262$ $\beta_1 = -7.07884627$ $F_{Meyer} = 1.0035957$	0.65	1.62	8.21

Continua...

Continua...

Modelo	Coeficientes	Critérios de Precisão		
		R ² ajustado	Syx (m)	Syx (%)
Curtis				
2021	$\beta_0 = 3.650724821$ $\beta_1 = -7.839439274$ $F_{\text{Meyer}} = 1,0035650$	0.65	1.81	8.17
2022	$\beta_0 = 3.68845399$ $\beta_1 = -8.418448731$ $F_{\text{Meyer}} = 1.0035633$	0.65	1.88	8.17
Trorey				
2019	$\beta_0 = 3.929585732$ $\beta_1 = 1.575528834$ $\beta_2 = -0.038216923$	0.63	1.01	6.10
2020	$\beta_0 = 1.712803485$ $\beta_1 = 1.88143834$ $\beta_2 = -0.03698285$	0.65	1.62	8.20
2021	$\beta_0 = 1.792405111$ $\beta_1 = 1.923548782$ $\beta_2 = -0.034505896$	0.65	1.81	8.16
2022	$\beta_0 = 1.80933621$ $\beta_1 = 1.86704100$ $\beta_2 = -0.031293947$	0.65	1.88	8.16

Onde: β_i : Coeficientes ajustados; R²ajustado: Coeficiente de determinação ajustado; Syx: Erro padrão da estimativa; FMeyer: Fator de Meyer

Baseado nos valores apresentados na Tabela 4 percebe-se que os coeficientes de determinação ajustados e os erros da estimativa foram muito similares entre os modelos de Curtis e Trorey. Ao se tratar de equações hipsométricas, o R² ajustado segundo pesquisadores como Finger (1992) e Campos e Leite (2006), afirmam que este valor raramente irá passar de 0,80, logo, os valores encontrados no presente trabalho estão dentro do valor esperado. Se tratando do erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx%), os valores obtidos corroboram os valores encontrados em outros trabalhos, como de Azevedo *et al.* (2011) que encontrou Syx% variando de 10 a 30%, e também Batista *et al.* (2001) que obteve valores oscilando entre 5 e 10%.

Segundo SCHNEIDER *et al.* (1988), a escolha da melhor equação de volume ou altura deve ser isenta de critérios pessoais, devendo ser baseada nos valores calculados de coeficiente de determinação, erro padrão residual, distribuição uniforme dos valores residuais. Sabendo-se da importância da análise dos resíduos a Figura 2 mostra os gráficos da dispersão das diferenças dos valores estimados com os observados, podendo, assim, detectar se existe tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo da linha de regressão.

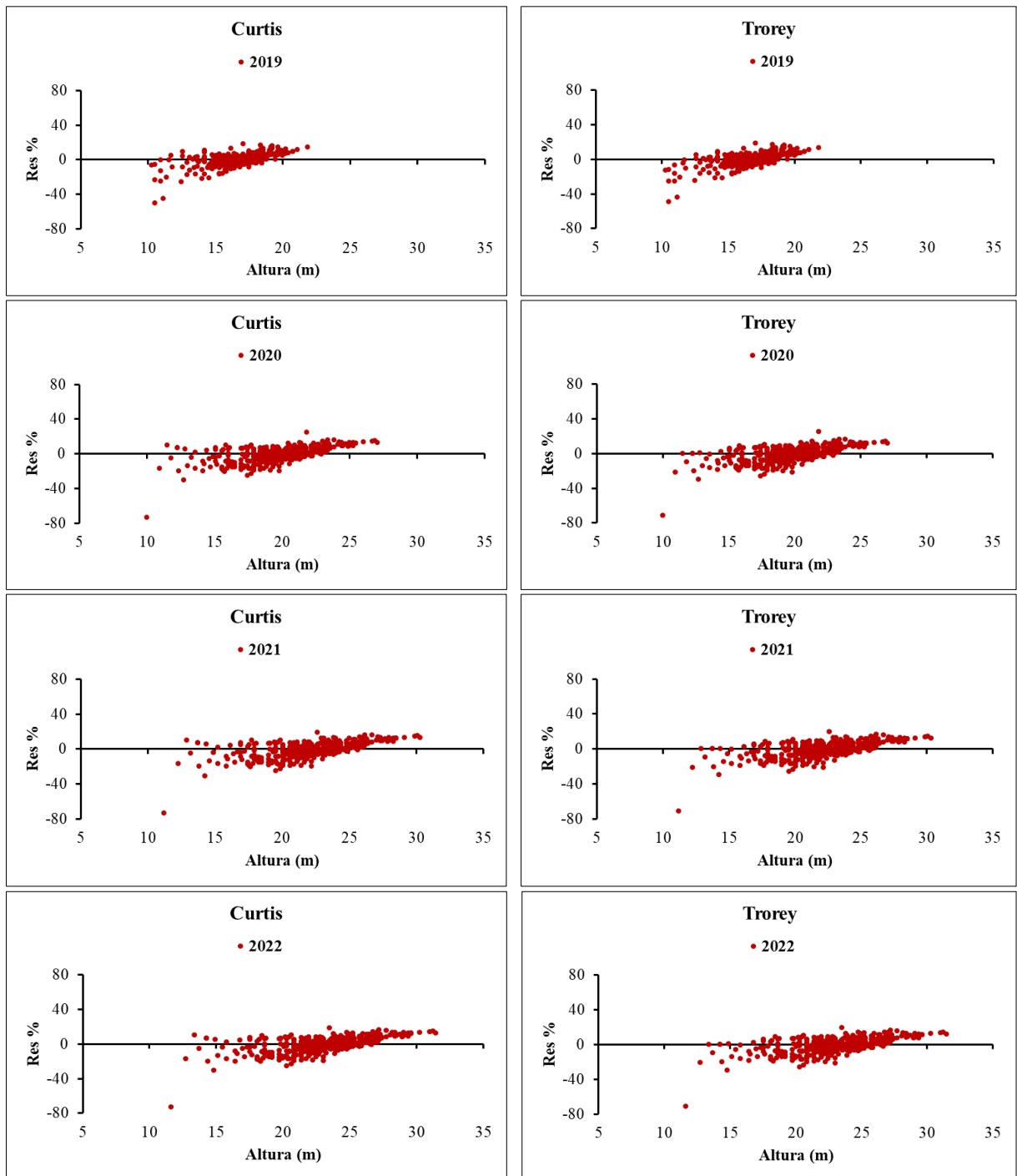


Figura 2. Gráfico de dispersão da distribuição residual (%) em função da altura observada, para os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022.

Ao analisar os gráficos de dispersão dos resíduos os modelos apresentam um leve grau de tendenciosidade em subestimar os valores estimados, ao longo da linha de regressão, tendo bastante dificuldade para estimar as alturas das árvores de menores diâmetros, levando a uma subestimação da variável considerada. Contudo, para estimar as alturas faltantes nos inventários, é preciso escolher apenas um modelo, sendo este o modelo de Curtis para os anos (2019, 2020, 2021 e 2022). Graficamente os modelos são bastante similares, porém é perceptível ver que o modelo de Curtis apresentou uma maior uniformidade na distribuição dos resíduos, com isso se mostrou ligeiramente superior ao modelo de Trorey para a estimativa da altura total para o referido povoamento estudado.

5.2 Classificação de Sítio

O melhor modelo ajustado no *Curve Expert 1.3* foi o de Logistic Model (ver equação 2), e acompanhando o modelo volta os seus parâmetros de estimativas que são apresentados na Tabela 5. Na Figura 3 tem-se o gráfico de dispersão residual em função da altura dominante que foi observada.

Tabela 5. Parâmetros de precisão do modelo de Logistic Model para cálculo das Alturas Dominantes.

Coefficientes	r	Syx (m)	Syx (%)
a = 25.19620	0.88	1.70	7.93
b = 30.22277			
c = 1.01000			

Onde: a,b,c: Coeficientes ajustados; r: Coeficiente de correlação; Syx: Erro padrão da estimativa.

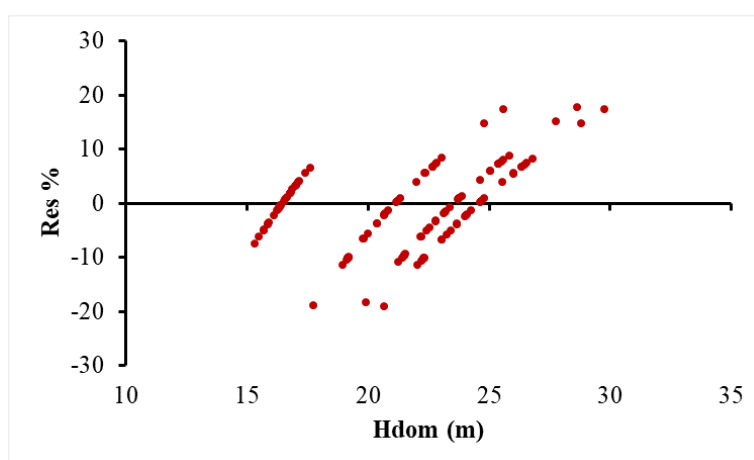


Figura 3. Gráfico de dispersão da distribuição residual (%) em função da altura dominante.

De um modo geral o Logistic Model apresentou bons resultados dos seus valores de coeficientes e de erro padrão da estimativa em porcentagem (%). No trabalho de Melo *et al.* (2017), o erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx %), está um pouco acima do valor com obtido neste trabalho, que foi de 12.03%, o que indica que para este povoamento, o modelo ajustado foi o que melhor aderiu a base de dados.

Os valores para construir os limites inferiores e superiores de cada classe de sítio estão apresentados na Tabela 6. O modelo como visto na Tabela 5 apresenta em termos médio um erro de 1,70m. Para tal, foi considerado tanto o menor quanto o maior fator, que são obtidos por uma série de dados entre a razão do Hdom observado pelo Hdom estimado, e para os valores de máximo e mínimo foi por resultado da amplitude, intervalo entre esses limites, e por último foi a etapa de definir o número de classes.

Tabela 6. Valores encontrados para as informações das classes de sítio na idade de referência de 7 anos.

Elementos	Valor
Menor Fator	0.84
Maior Fator	1.22
Hdom estimada (m) pela I_{ref}	24.56
Limite Máximo	29.90
Limite Mínimo	20.64
Amplitude de Classes (m)	9.00
Número de Classes	3

Onde: Hdom: Altura dominante; I_{ref} : Idade de referência = 7anos.

Os valores de altura dominante à idade índice de 7 anos variaram de 20,64 a 29,90 metros, com amplitude de 9 metros. Contudo, considerou-se o intervalo entre 20 e 32 metros, tendo sido projetadas 3 classes de sítio, com intervalos de 4 metros entre as curvas (Tabela 7).

Tabela 7. Classes de sítio segundo o Logistic Model para a Idade de Referência (I_{ref}) igual a 7 anos, a partir do método da Curva-Guia.

Classe de Sítio	Intervalo de Classe na I_{ref} (m)	Índice de Sítio (m)
I	28.0 +32.0	30
II	24.0 +28.0	26
III	20.0 +24.0	22

Onde: I_{ref} : Idade de referência = 7anos; m: metros.

Por fim, a Figura 4 apresenta o gráfico anamórfico das curvas limites das classes de sítio I, II e III, gerado pelo método da Curva-Guia. Segundo Campos e Leite (2013), a classificação por índices de local constitui um método prático e consistente de avaliação da qualidade do local, pois todos os fatores ambientais são refletidos de modo interativo no crescimento em altura, na qual também é relacionado com o volume.

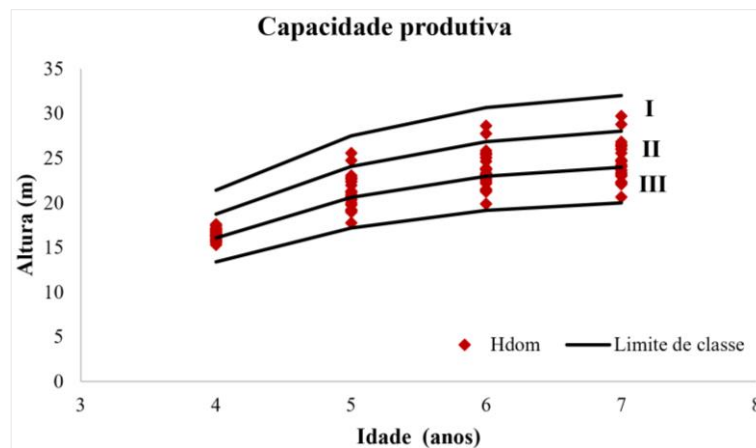


Figura 4. Limite das classes de sítio florestal, classificadas segundo o Logistic Model pelo método da Curva-Guia para o povoamento de *Eucalyptus urophylla*.

A partir de uma equação representativa dessa curva, uma equação de índices de sítio é formada no momento em que a idade do povoamento se equipara à idade de referência, e a altura dominante (Hdom) corresponde ao índice de sítio (IS) (Figueiredo, 2005).

5.3 Ajuste dos Modelos Volumétricos

No ajuste dos modelos volumétricos, foram utilizados os dados da cubagem rigorosa por meio do método Samilan dos volumes por árvore. Logo, foram ajustados os modelos volumétricos de Spurr e Schumacher-Hall, como apresentado na Tabela 8. Seguindo os mesmos indicadores de precisão do item 4.2.5.

Tabela 8. Estatísticas de precisão dos modelos volumétricos ajustados.

Modelo	Coeficientes	Critérios de Precisão		
		R ² ajustado	Syx (m ³)	Syx (%)
Spurr	$\beta_0 = 0.01668$ $\beta_1 = 0.00004$	0.97	0.0106	4.61
Schumacher-Hall	$\beta_0 = -11.59673$ $\beta_1 = 1.40587$ $\beta_2 = 1.93377$ $F_{Meyer} = 1.00067$	0.98	0.0087	3.79

Onde: β_i : Coeficientes ajustados; R²ajustado: Coeficiente de determinação; Syx: Erro padrão da estimativa. FMeyer: Fator de Meyer.

Ao avaliar os resultados estatísticos obtidos na validação dos modelos, observou-se que o modelo 1 (Spurr) obteve os resultados inferiores quando comparados ao outro modelo, isso não impede a sua aplicabilidade, já que os resultados são bem próximos. O modelo 2 (Schumacher e Hall), obteve resultados com as melhores estatísticas, comprovando a sua eficiência. As representações gráficas dos ajustes e análises gráficas de resíduos dos dois modelos para estimar o volume total de árvores de *Eucalyptus urophylla* são apresentadas na Figura 5.

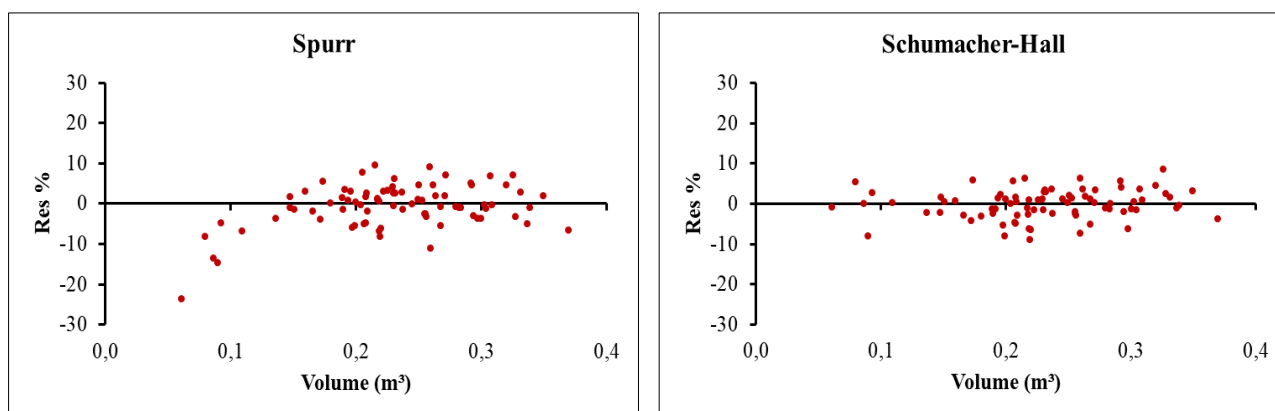


Figura 5. Disposição dos resíduos (%) em função do volume observado na cubagem para os dois modelos volumétricos ajustados.

Na literatura, é amplamente reconhecido que o modelo de Schumacher e Hall, em suas várias formas, é bastante eficaz na estimativa do volume de árvores do gênero *Eucalyptus* e outros, como *Pinus*. Os resultados estatísticos obtidos são geralmente satisfatórios, com um R^2 ajustado em torno de 0,9, conforme relatado por Thomas *et al.* (2006), Azevedo *et al.* (2011), Sales *et al.* (2015), entre outros. Recomenda-se testar mais de um modelo, mesmo que a espécie seja a mesma, pois as condições do sítio influenciam o comportamento de crescimento das árvores e a precisão das estimativas das suas variáveis.

Analisando o gráfico de resíduos em função do volume observado de ambos os modelos (Figura 5), o modelo de Spurr há uma maior dispersão dos resíduos em volumes menores, o que sugere que o modelo pode não ser tão preciso para volumes baixos. Enquanto que a dispersão dos resíduos no modelo dois (Schumacher-Hall) é menor em comparação com o modelo de Spurr, indicando que o modelo pode fornecer estimativas mais precisas em uma faixa mais ampla de volumes.

O uso de modelos de dupla entrada geralmente resulta em estimativas mais acuradas, conforme relatado em Pereira *et al.* (2016), com destaque para o modelo de Schumacher e Hall.

5.4 Modelagem em Nível de Povoamento Total (MPT)

O modelo de Clutter (equação 5) apresentou estimativas de precisão de ajuste conforme mostrado na Tabela 9. Ele demonstrou um bom ajuste para a projeção dos volumes, destacando-se pela sua capacidade de fornecer estimativas confiáveis e precisas. Isso indica que o modelo é eficaz na previsão do crescimento e volume das árvores.

Tabela 9. Estatísticas de precisão do modelo de Clutter ajustado.

Modelo	Coeficientes	Critérios de Precisão		
		R ² ajustado	Syx (m ³)	Syx (%)
Clutter	$\beta_0 = 2.900349$	0.97	9.36	6.65
	$\beta_1 = -10.3492$			
	$\beta_2 = -3.49507$			
	$\beta_3 = 1.106328$			
	$\beta_4 = 3.97752$			
	$\beta_5 = 0.011351$			
	$F_{\text{Meyer}} = 1,002429$			

Onde: β_i : Coeficientes ajustados; R²ajustado: Coeficiente de determinação; Syx: Erro padrão da estimativa. FMeyer: Fator de Meyer.

Os resultados a partir dos dados de ajuste e precisão foram satisfatórios, pois apresentaram alto valor do coeficiente de determinação 0.97 e erro padrão da estimativa de 6.65%. Na Figura 6 tem-se o gráfico de dispersão residual em função do volume.

O valor do coeficiente β_1 foi negativo, resultado este condizente com a literatura pois é necessário que este coeficiente seja negativo, para projetar de forma concisa volumes futuros Campos e Leite (2013).

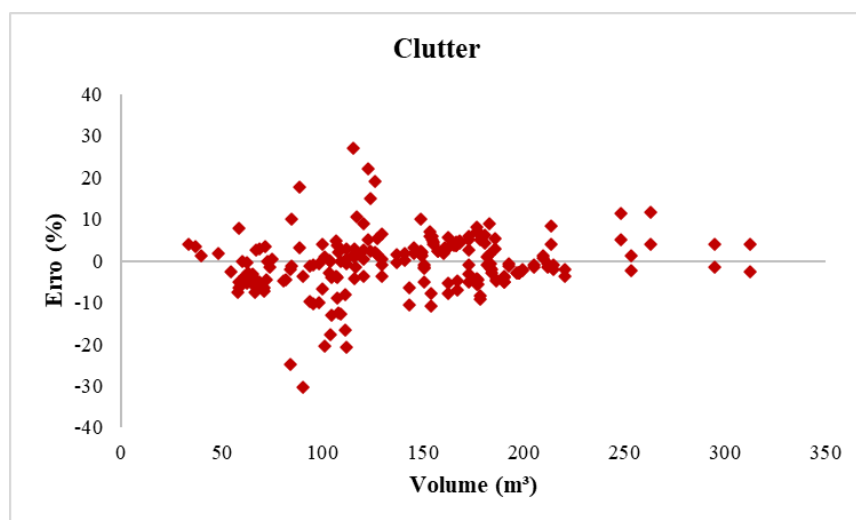


Figura 6. Gráfico de dispersão da distribuição residual (%) em função do volume observado para o modelo de Clutter.

Com base nas estimativas de ajuste e precisão e da análise gráfica, o modelo de Clutter teve um bom ajuste, indicando que fixando a área basal e a idade inicial, este modelo consegue projetar com precisão valores do volume para idades futuras. A distribuição dos resíduos está relativamente simétrica em torno da linha de zero, o que sugere que os erros são distribuídos de maneira equilibrada entre superestimativas e subestimativas. Scolforo (2006) obteve resultados semelhantes ao ajustar o modelo completo de Clutter para determinar a rotação silvicultural em plantações de *Eucalyptus*, o que indica que o ajuste está dentro do esperado.

5.5 Rotação Silvicultural

A produção volumétrica para cada ano foi obtida anteriormente, sendo viável então determinar a idade ótima de corte ou idade silvicultural para cada um dos 3 sítios. Os valores do cálculo para Incremento Médio Anual (IMA) e Incremento Corrente Anual (ICA) com base nos dados da Modelagem a Nível de Povoamento Total (MPT), estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Valores dos incrementos anuais e produção volumétrica ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) por classe de sítio para determinação da rotação silvicultural.

Idade (anos)	Sítio I			Sítio II			Sítio III		
	Produção	IMA	ICA	Produção	IMA	ICA	Produção	IMA	ICA
3	83,03	27,68		24,72	8,24		21,35	7,12	
4	147,69	36,92	64,65	58,99	14,75	34,28	52,00	13,00	30,65
5	208,68	41,74	60,99	99,73	19,95	40,74	88,87	17,77	36,87
6	262,78	43,80	54,10	141,74	23,62	42,01	127,12	21,19	38,25
7	309,83	44,26	47,05	182,35	26,05	40,61	164,21	23,46	37,09
8	350,57	43,82	40,74	220,39	27,55	38,04	199,01	24,88	34,80
9	385,93	42,88	35,36	255,46	28,38	35,07	231,12	25,68	32,11
10	416,78	41,68	30,85	287,55	28,76	32,09	260,52	26,05	29,40
11	443,85	40,35	27,06	316,83	28,80	29,28	287,34	26,12	26,83
12	467,74	38,98	23,89	343,53	28,63	26,70	311,81	25,98	24,46
13	488,96	37,61	21,22	367,90	28,30	24,37	334,13	25,70	22,33
14	507,91	36,28	18,95	390,18	27,87	22,28	354,55	25,32	20,41

Onde: ICA: Incremento Corrente Anual; IMA: Incremento Médio Anual.

As curvas apresentadas na Figura 7 possuem um ponto assintótico, que seria onde o ICA e IMA se cruzam, o que indica que a floresta está madura, do ponto de vista silvicultural.

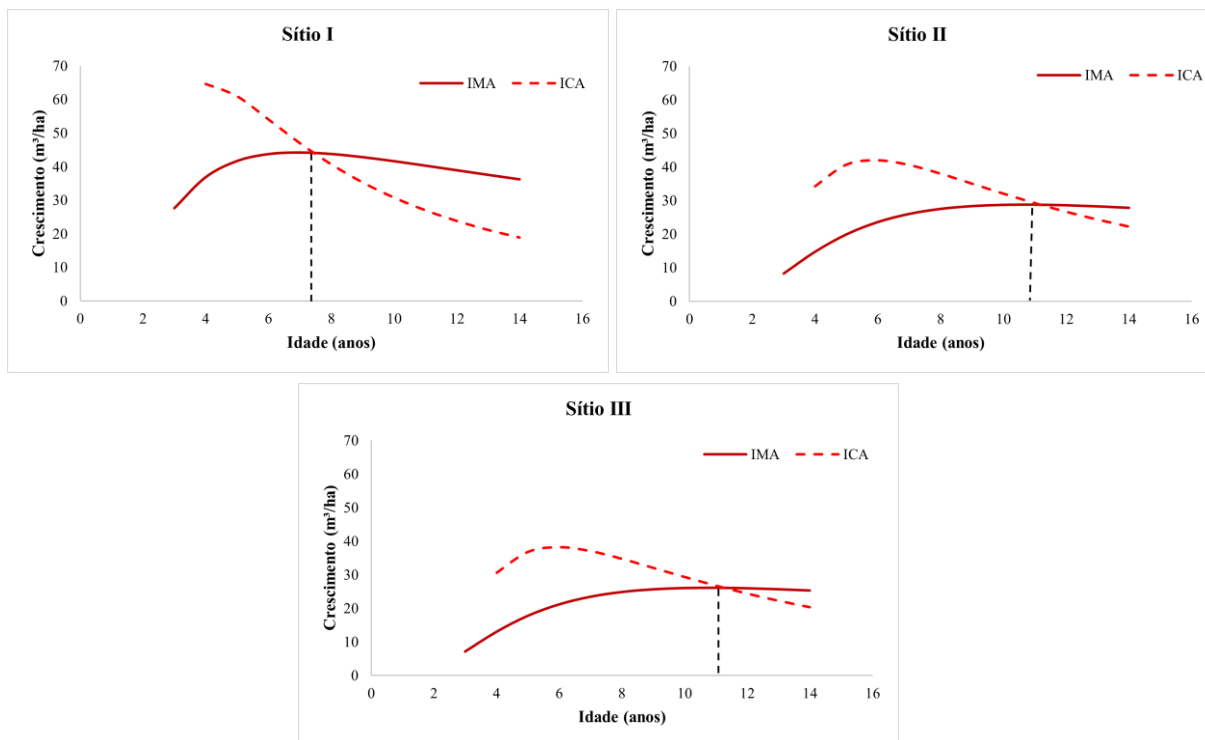


Figura 7. Cruzamento do Incremento Corrente Anual (ICA) com o Incremento Médio Anual (IMA) para definição da idade de rotação técnica para os índices de sítio (S) igual a 30, 26 e 22

No Brasil, grande parte dos plantios de eucalipto ocorrem em ciclos curtos, por volta de 6 a 7 anos, destaca Scolforo (2006), e para Gonçalves et al. (2013), este ciclo varia de 6 a 8 anos. Como pode ser observado, o sítio I é o que possui a menor idade de rotação silvicultural, por volta dos 8 anos, idade conforme a literatura, o mesmo apresenta produção em volume na idade de rotação entre 309,82 e 350,57 m³/ha, de acordo com a tabela de produção (Tabela 10). E os outros sítios (II e III), deram idade ótima de corte aos 12 anos, com suas produções entre 316,83 e 343,52 m³/ha para o sítio II, e para o sítio III entre 287,34 e 311,80 m³/ha. O sítio I apresenta maior volume de madeira na idade de corte e idade de rotação mais próxima das usuais, quando comparado com os demais Sítios.

No âmbito desse tópico, nesse momento intervenções como corte raso ou desbaste acontecem. Quando um sítio florestal é altamente produtivo, as árvores atingem o tamanho e a qualidade desejados em um período mais curto. Isso permite que o manejo silvicultural adote rotações mais curtas, maximizando a produtividade e a rentabilidade da plantação.

Verifica-se pelos dados da Tabela 10 que o incremento corrente anual (ICA) atinge os valores máximos nos anos 4, 6 e 6 para os sítios I, II e III respectivamente. Decrescendo acentuadamente nos anos subsequentes. Conseqüentemente, inicia-se a partir dos anos 8, 12 e

12 para os sítios I, II e III respectivamente um sensível decréscimo do incremento médio anual (IMA).

Assim, quando o IMA atinge o seu máximo é exatamente quando as duas se cruzam (Figura 7). O máximo IMA é o ponto que define a máxima média de incremento da produção que determinada espécie pode alcançar. Dessa maneira, a relação entre as curvas é que, ICA é maior que IMA, e o IMA vai aumentando até que cruze a linha do ICA e se torna maior, e então a curva do IMA entra em decréscimo. E como se observa pela Figura 7 e pela Tabela 10, o corte deverá ser efetuado entre o 7º e 8º ano para o sítio I, entre o 11º e 12º ano para os Sítios II e III.

A seleção da espécie correta é um dos fatores mais cruciais para o sucesso das plantações de eucaliptos. Ao escolher qual espécie plantar, é importante considerar alguns fatores chave que vão interferir diretamente no plantio. Higa (2000) indica cinco que devem ser pensados, sendo estes: a finalidade do plantio; clima e solo do local de plantio; conhecimentos silviculturais sobre a espécie selecionada; produtividade e rentabilidade da plantação com a espécie selecionada; e disponibilidade de sementes melhoras. A mesma autora destaca a importância das condições edafoclimáticas, pois o crescimento das plantas depende do solo e do clima, resultando em variações na produtividade de uma mesma espécie. Por exemplo, plantações de eucalipto para lenha, carvão vegetal, moirões e indústria de celulose geralmente são colhidas entre 6 e 8 anos de idade. Já para a produção de madeira serrada, a colheita ocorre após 12 ou 13 anos.

Os valores apresentados na Tabela 10 o corroboram com os dados encontrados na literatura de trabalhos realizados no estado de Goiás, refletindo a consistência e a validade das informações obtidas. De acordo com Reis (2017), a produtividade média de eucalipto no estado de Goiás é de 35 m³ de madeira por hectare. Esta concordância sugere que os métodos e as condições analisadas no estudo em questão são representativos da realidade regional, reforçando a credibilidade dos resultados e a adequação das práticas de manejo florestal descritas.

5.6 Rotação Financeira

A definição da rotação financeira, diferentemente da silvicultural ou técnica, está voltada para o fluxo financeiro do projeto, distinguindo-se o capital próprio e de terceiros, a fim de determinar a capacidade financeira do projeto e o retorno do capital investido. Com base na produção volumétrica estimada do quinto ao décimo quarto ano pelas projeções em nível de povoamento total, acrescido aos dados (Tabela 1) de custo de implantação, condução,

exploração e valor pago no arrendamento da terra, bem como o preço a ser vendido por cada metro cúbico de madeira, a rotação financeira foi definida. Os critérios para esta definição já foram estabelecidos no item 4.2.7. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 11, onde os valores em negrito do interior da tabela representam os máximos de cada possível rotação, tomando como critério de escolha o BPE, já que é o mais indicado para comparar projetos com horizontes de planejamentos diferentes por trazer o valor dos custos ou das receitas por unidade de tempo (Dias, 2000).

Tabela 11. Valores encontrados dos critérios para a definição da rotação financeira.

Sítio	Critérios	Rotação (anos)									
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I (S = 27,5)	VPL (R\$ ha ⁻¹)	10.031,55	12.991,49	14.953,44	16.174,36	16.816,72	17.014,90	16.875,51	16.481,87	15.898,73	15.176,41
	BPE (R\$ ha ⁻¹)	2.381,45	2.641,98	2.678,68	2.604,65	2.472,43	2.311,78	2.139,70	1.965,91	1.795,92	1.632,75
	VPL _∞ (R\$ ha ⁻¹)	39.690,89	44.033,05	44.644,74	43.410,88	41.207,20	38.529,65	35.661,59	32.765,14	29.932,05	27.212,55
	TIR (%)	30,32	29,24	27,09	24,83	22,72	20,83	19,15	17,66	16,35	15,19
	MTIR (%)	27,17	26,18	24,16	22,09	20,19	18,49	17,01	15,71	14,58	13,58
	VET (R\$ ha ⁻¹)	41.013,86	45.356,02	45.967,71	44.733,85	42.530,17	39.852,62	36.984,56	34.088,11	31.255,02	28.535,52
	II (S = 24,5)	VPL (R\$ ha ⁻¹)	1.076,41	3.605,65	5.627,97	7.189,92	8.321,67	9.077,24	9.515,45	9.691,75	9.655,26
BPE (R\$ ha ⁻¹)		255,54	733,26	1.008,17	1.157,84	1.223,47	1.233,31	1.206,49	1.156,00	1.090,66	1.016,47
VPL _∞ (R\$ ha ⁻¹)		4.258,94	12.220,92	16.802,78	19.297,26	20.391,18	20.555,11	20.108,19	19.266,72	18.177,66	16.941,20
TIR (%)		9,72	14,84	16,52	16,79	16,41	15,76	14,98	14,19	13,41	12,66
MTIR (%)		9,18	13,56	14,93	15,10	14,72	14,12	13,44	12,74	12,07	11,44
VET (R\$ ha ⁻¹)		5.581,91	13.543,89	18.125,75	20.620,23	21.714,15	21.878,08	21.431,16	20.589,69	19.500,63	18.264,17
III (S = 21,5)		VPL (R\$ ha ⁻¹)	183,85	2.471,74	4.300,55	5.714,01	6.736,70	7.416,57	7.806,71	7.957,60	7.914,06
	BPE (R\$ ha ⁻¹)	43,65	502,66	770,38	920,16	990,45	1.007,67	989,84	949,16	893,97	829,97
	VPL _∞ (R\$ ha ⁻¹)	727,42	8.377,65	12.839,65	15.336,02	16.507,42	16.794,56	16.497,27	15.819,32	14.899,55	13.832,89
	TIR (%)	6,67	12,39	14,48	15,05	14,90	14,42	13,78	13,10	12,41	11,74
	MTIR (%)	6,57	11,45	13,18	13,61	13,43	12,98	12,42	11,82	11,23	10,67
	VET (R\$ ha ⁻¹)	2.050,39	9.700,62	14.162,62	16.658,99	17.830,39	18.117,53	17.820,24	17.142,29	16.222,52	15.155,86

Onde: VPL: Valor Presente Líquido; VPL_∞: VPL Infinito; BPE: Benefício Periódico Equivalente; VET: Valor Esperado da Terra; TIR: Taxa Interna de Retorno; MTIR: Taxa Interna de Retorno Modificada.

O Valor Presente Líquido (VPL) consiste em trazer para o presente todas as projeções de fluxo de caixa futuras, aplicando um desconto com base em uma taxa de juros específica e somando esses valores de forma algébrica (Goes e Chinelato, 2018). Deste modo, a

viabilidade financeira de um projeto analisado pelo método do VPL é indicada pela diferença positiva entre as receitas e custos, corrigidos de acordo com a taxa de desconto utilizada no projeto. Logo, quanto maior o VPL, mais atrativo será o projeto, e quanto menor for, o projeto será economicamente inviável. Autores como por exemplo (Barbieri et al., 2007) comentam que para que haja retorno sobre o investimento, será necessário que o total das entradas de caixa supere o das saídas. Contudo, comparar somente o VPL incorre em subestimação das rotações mais curtas, já que tal critério é mais indicado para comparação de projetos de mesma idade. E o critério do BPE se sobressai por razões já explicadas, por isso, quanto maior o Benefício Periódico Equivalente, melhor é o projeto (Rezende e Oliveira, 2013).

Ao escolher os valores de VPL ao invés do BPE, estaria considerando o valor total dos fluxos de caixa descontados ao longo do horizonte específico de cada projeto. No entanto, isso ignora a duração do projeto, o que pode levar a comparações injustas. Por exemplo, um VPL maior pode ser resultado de um projeto mais longo, mas isso não necessariamente indica uma melhor eficiência ou lucratividade anualizada. Projetos com VPLs mais altos em horizontes mais longos podem parecer mais atraentes à primeira vista. No entanto, se um projeto de 9 anos e outro de 12 anos são comparados apenas com base no VPL, o projeto de 12 anos pode parecer melhor apenas porque tem um período maior para acumular valor. O BPE normaliza isso ao considerar uma anuidade contínua, tornando a comparação mais justa em termos de valor anualizado. Por exemplo, o Sítio I tem um maior VPL de R\$ 17,014.90 em 10 anos, mas seu maior BPE é R\$ 2,678.68 no ano 7; no Sítio II e III o maior VPL se encontram no ano 12 com valores de R\$ 9,691.75 e R\$ 7,957.60 respectivamente, enquanto que o BPE está no ano 9 para o sítio II com R\$ 1,223.31 e R\$ 1,007.67 para o sítio III no ano 10. Optar por VPL em projetos com horizontes temporais distintos pode levar a decisões inconsistentes, em que projetos mais longos sempre parecerão mais atraentes, mesmo que não sejam a melhor opção em termos de eficiência anualizada.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR) são ambas ferramentas úteis para avaliar a rentabilidade de projetos, mas diferem significativamente em suas abordagens e suposições. A TIR calcula a taxa de retorno que zera o Valor Presente Líquido (VPL) dos fluxos de caixa do projeto, assumindo que todos os fluxos de caixa são reinvestidos à própria TIR, o que pode não refletir a realidade dos reinvestimentos (Barbieri et al., 2007). Por outro lado, a MTIR ajusta essa suposição, utilizando uma taxa de reinvestimento mais realista. Ressalto que a taxa mínima de atratividade (TMA) foi utilizada de acordo com o crédito de investimento Pronaf do grupo

ABC+ do Banco do Brasil, e a Taxa de revestimento foi de acordo o Tesouro Direto Prefixado, 6 e 11% na devida ordem.

Na escolha da rotação financeira para um projeto florestal considerando o critério do BPE, a MTIR indica para o Sítio I o valor de 24.16%, Sítio II 14.72% e 12.98% para o Sítio III. Isso significa que, após ajustar para a taxa realista de reinvestimento, se o projeto for executado conforme planejado e os fluxos de caixa forem reinvestidos a uma taxa realista, o investimento gerará um retorno médio anual de 24.16% sobre o capital investido no caso do Sítio com a maior capacidade produtiva (Sítio I), igualmente para os demais Sítios.

5.7 Rotação Econômica

O modelo desenvolvido por Duerr, considera que a maturidade financeira dos povoamentos ocorre quando, a taxa de crescimento do valor da produção florestal (TXC), se equipara com a taxa alternativa que o proprietário florestal tem a sua disposição (Taxa Mínima de Atratividade – TMA) (Duerr *et al.*, 1956). A Taxa de Crescimento (TXC) é entendida como a taxa média de crescimento de um investimento. O retorno exigido pelos fornecedores de capital, ou o custo de capital, pode ser utilizado como a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) nas análises de projetos de investimento (Schroeder, 2005)

A rotação econômica é aquela que maximiza o lucro de um fluxo de caixa, no caso, a idade na qual o VPL foi maximizado pode ser considerada como a de corte. A idade ótima de corte do ponto de vista econômico, está apresentada na Tabela 12, onde os valores em destaque indicam essa igualdade entre a TXC e a TMA que é de 6%.

Tabela 12. Valores encontrados dos critérios para a definição da rotação econômica.

Idade (anos)	Sítio I			Sítio II			Sítio III		
	Produção	IMA	TXC	Produção	IMA	TXC	Produção	IMA	TXC
3	83,035	27,68		24,715	8,24		21,351	7,12	
4	147,687	36,92	78	58,993	14,75	139	52,005	13,00	144
5	208,676	41,74	41	99,730	19,95	69	88,872	17,77	71
6	262,779	43,80	26	141,743	23,62	42	127,120	21,19	43
7	309,828	44,26	18	182,354	26,05	29	164,209	23,46	29
8	350,571	43,82	13	220,391	27,55	21	199,006	24,88	21
9	385,935	42,88	10	255,460	28,38	16	231,117	25,68	16
10	416,781	41,68	8	287,552	28,76	13	260,516	26,05	13
11	443,846	40,35	6	316,831	28,80	10	287,343	26,12	10
12	467,739	38,98	5	343,529	28,63	8	311,807	25,98	9
13	488,960	37,61	5	367,897	28,30	7	334,135	25,70	7
14	507,914	36,28	4	390,176	27,87	6	354,546	25,32	6

Onde: IMA: Incremento Médio Anual; TXC: Taxa de Crescimento.

A determinação da idade ótima de acordo com este critério fica na dependência da taxa mínima desejada pelo proprietário florestal. Por exemplo a taxa mínima imposta pelo produtor florestal é de 6%, logo, a idade de corte deve estar próxima a 11 anos no sítio I, e 14 para os Sítios II e III. Percebe-se, na medida em que o povoamento se torna mais maduro, ou seja, aumenta a sua produção, a taxa de crescimento do valor diminui (Figura 8). Deste modo, se a taxa mínima de atratividade é maior do que a taxa do valor do povoamento aguarda-se mais um período. Se forem iguais realiza-se o corte da floresta.

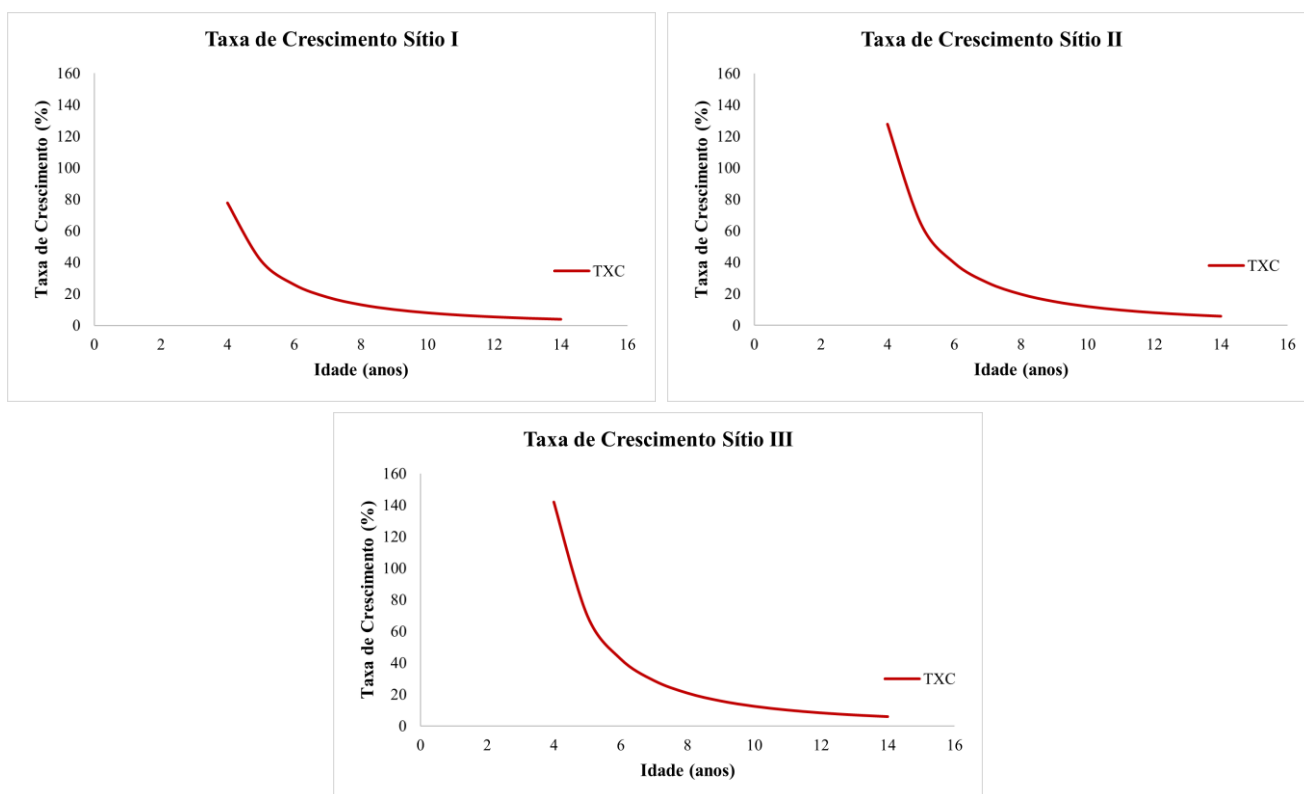


Figura 8. Taxa de Crescimento do Povoamento Florestal (Duerr).

Conforme a Tabela 12, a produção de madeira aumenta com a idade, e o IMA inicialmente aumenta, atinge um pico e depois tende a estabilizar ou diminuir. Enquanto que a Taxa de Crescimento inicialmente é alta, e tende a diminuir com o tempo. Do ponto de vista econômico, a idade ótima de corte é aquela que maximiza o VPL. Isso leva em consideração não apenas a produção de madeira, mas também os custos de manutenção e o valor temporal do dinheiro. Portanto, pelo método de Duerr, a idade ótima de corte geralmente ocorre em idades mais avançadas porque é quando o valor econômico da produção de madeira maximiza, considerando tanto o volume acumulado quanto o valor presente líquido.

O proprietário do plantio está interessado em obter o máximo retorno possível sobre seu investimento. À medida que as árvores envelhecem, o volume da madeira geralmente aumenta, resultando em um maior valor de mercado. Colher em idades avançadas permite que o proprietário capture esse valor máximo, o que mostra a Tabela 12, idade ótima de corte do ponto de vista econômico ocorrendo por volta dos anos 10 e 11 para o Sítio I, e 13 e 14 para os Sítios II e III.

As atividades florestais se diferenciam de outros setores por três características principais: o longo tempo necessário para a produção de madeira; o fato de que a árvore atua simultaneamente como capital gerador e como produto; e a existência de valores florestais que não são diretamente mensurados pelos mercados convencionais, devido à presença de externalidades (Duerr, 1972 apud. Carvalho, 2021).

5.8 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade mostrou como o comportamento da produção interfere no Benefício Periódico Equivalente (BPE), aumentando ou diminuindo conforme o cenário escolhido. Os resultados apresentados na Tabela 13 mostram as variações nos valores de BPE de acordo com os cenários escolhidos, o cenário 1 representa um aumento de 20% na produção, enquanto o cenário 2 reflete uma diminuição de 20% na produção.

Tabela 13. Análise de Sensibilidade.

	Cenário	Critério	Idade									
			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Sítio I	1	BPE (R\$ ha ⁻¹)	3.195,86	3.470,78	3.490,73	3.383,90	3.211,30	3.007,43	2.791,90	2.575,88	2.365,62	2.164,47
	2		1.567,05	1.813,18	1.866,64	1.825,41	1.733,56	1.616,13	1.487,49	1.355,93	1.226,22	1.101,03
Sítio II	1	BPE (R\$ ha ⁻¹)	644,76	1.180,31	1.486,11	1.647,72	1.712,55	1.713,26	1.672,06	1.604,00	1.519,30	1.424,93
	2		-133,68	286,20	530,22	667,95	734,39	753,35	740,93	708,01	662,01	608,01
Sítio III	1	BPE (R\$ ha ⁻¹)	390,49	903,59	1.200,77	1.362,51	1.432,92	1.442,50	1.412,07	1.355,79	1.283,28	1.201,14
	2		-303,20	101,73	339,99	477,81	547,97	572,85	567,60	542,53	504,67	458,81

Onde: BPE: Benefício Periódico Equivalente.

Nos valores destacados em negrito, observa-se que, no Sítio I, sob o cenário 1, o BPE atinge seu valor máximo aos 7 anos, com R\$ 3.490,73, indicando que essa é a melhor idade para o corte da floresta, maximizando o retorno econômico. No Sítio II, ainda sob o cenário 1, o comportamento é semelhante, com o corte ideal ocorrendo aos 9 anos, apresentando um BPE de R\$ 1.712,55. Já no Sítio III, no mesmo cenário, o ciclo ótimo é um pouco mais longo,

ocorrendo aos 10 anos, com um BPE de R\$ 1.442,50, o que sugere que as características desse sítio demandam um período maior para alcançar a máxima rentabilidade.

Quando analisado o cenário 2, que reflete uma redução de 20% na produção, o retorno financeiro muda. No Sítio I, a melhor idade de corte trás um BPE de R\$ 1.866,64, demonstrando que, em condições de menor produtividade, o retorno financeiro tem uma queda de quase metade quando comparado com o cenário de mais 20% na produção. No Sítio II, mesmo com a queda na produção, a idade ideal de corte permanece aos 9 anos, embora o BPE reduza significativamente para R\$ 734,39, refletindo o impacto da menor produtividade. E no sítio menos produtivo (III), o BPE para o cenário 2 foi de R\$ 572,85.

Em relação ao valor negativo destacado em vermelho, nos Sítio II e III, aos 5 anos sob o cenário 2, o BPE é de - R\$ 133,68 e - R\$ 303,20 respectivamente. Isso indica que cortar a floresta precocemente, em condições de baixa produtividade, resultaria em prejuízo financeiro, pois as receitas geradas não seriam suficientes para cobrir os custos. Esse cenário revela o risco associado a decisões de corte antecipadas em condições desfavoráveis de produção, tornando o projeto economicamente inviável nessa idade.

Dessa forma, a análise mostra que a idade de corte ideal varia conforme as condições de produção e o sítio, sendo necessário ajustar o manejo para maximizar o retorno econômico de acordo com cada contexto específico.

6 CONCLUSÃO

Portanto, em vista dos objetivos estabelecidos neste trabalho, conclui-se que:

A classificação do sítio usando o método da Curva-Guia foi eficaz na representação das variações de produtividade no povoamento, identificando três classes de sítio.

A Modelagem em Nível de povoamento total (MPT) de Clutter, mostrou que o modelo é capaz de fazer projeções consistentes dos volumes futuros, fixando idade inicial e área basal.

Do ponto de vista Silvicultural ou Técnico, os Sítios mais produtivos, o corte precoce é favorecido.

A rotação econômica geralmente ocorre em idades mais avançadas, porque é quando o valor econômico da produção de madeira maximiza. Já que à medida que as árvores envelhecem, o volume da madeira geralmente aumenta, resultando em um maior valor de mercado.

Além disso, a análise de sensibilidade indicou que rotações mais curtas apresentam maior vulnerabilidade a oscilações negativas de produção, o que pode impactar significativamente a rentabilidade.

7 REFERÊNCIAS

- ABIMCI. **O Setor**. Disponível em: <<https://abimci.com.br/o-setor/>>. Acesso em: 10 dez. 2023.
- ANGELO, H. et al. **Aspectos financeiros da produção de teca no Estado de Mato Grosso**. Floresta, v. 39, n. 1, p. 23-32, 2009.
- AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. O.; BARRETO, P. A. B.; CONCEIÇÃO JÚNIOR, V. **Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 68, p. 309-318, 2011.
- AZEVEDO, T.L. et al. **Equações hipsométricas e volumétricas para um povoamento de Eucalyptus sp.** localizado na FLONA do IBURA, Sergipe. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.6, n.1, p.105-112, 2011.
- BARBIERI, J. C.; ÁLVARES, A. C. T.; MACHLINE, C. **Taxa Interna de Retorno: controvérsias e interpretações**. Revista GEPROS, n. 4, p. 131, 2007.
- BATISTA, J. L.; COUTO, H. T. Z.; MARQUESINI, M. **Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo em três tipos de floresta**. Scientia Forestalis, n. 60, p. 149-163, dez. 2001.
- BENTES-GAMA, Michelliny de Matos et al. **Análise econômica de sistemas agroflorestais na Amazônia Ocidental, Machadinho D'Oeste-RO**. Revista Árvore, v. 29, p. 401-411, 2005.
- BERGER, Ricardo. **Aplicação de critérios econômicos para determinação da maturidade financeira de povoamentos de Eucaliptos**. 1985.
- CABACINHA, CHISTIAN DIAS. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4.ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. atualizada e ampliada. Viçosa: Editora UFV. 2017. 636 p.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2006. 470p.

CARVALHO, Kayan de Sousa. **O lucro por espécie em concessão florestal**. 2021.

CORDEIRO, Castro Coimbra et al. **Análise econômica dos sistemas de cultivo com *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (Paricá) E *Ananas comosus* var. *erectifolius* (LB Smith) Coppus & Leal (Curauá) no município de Aurora do Pará (pa), Brasil**. Revista de la Facultad de Agronomía, v. 26, n. 2, p. 243-265, 2009.

CORDEIRO, Sidney Araujo et al. **Simulação da variação do espaçamento na viabilidade econômica de um sistema agroflorestal**. Floresta e Ambiente, v. 25, 2017.

CROPLIPE. **Eucalipto: a floresta produtiva e rentável**. 2020 Disponível em: <https://croplifebrasil.org/noticias/eucalipto-a-floresta-produtiva-e-rentavel/>. Acesso em: 8 mai. 2024.

DIAS, A. N. **Modelagem e avaliação econômica de plantações de eucalipto submetidas a desbastes**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2000.

DUERR, W. A.; FEDKIW, J.; GUTTEMBERG, S. **Financial maturity: a guide to profitable timber growing**. Washington, DC, USDA-Forest Service, 1956. 74p. (General Technical Bulletin, 1146).

DADOSMUNDIAIS. **Evolução das taxas de inflação nos Estados Unidos da América**. Disponível em: <<https://www.dadosmundiais.com/america/usa/inflacao.php>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

DORNELES, Joaquim Luiz RODRIGUES. **Método multiperiódico de avaliação contínua de investimentos realizados em ativo imobilizado por empresas de transporte rodoviário de cargas**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE CUSTOS. 2007.

FERREIRA, Luca Smiderle. **Viabilidade econômica da incorporação de residencial multifamiliar: aplicação de análise técnica para mitigação de riscos ao empreender**. 2021.

FERREIRA, M. **Melhoramento e a silvicultura intensiva clonal**. IPEF, Piracicaba, n. 45. p. 22-30, 1992.

FIEDLER, Nilton Cesar et al. **Análise operacional e de custos da implantação mecanizada de eucalipto**. Revista Árvore, p. //doi. org/10.1590/1806-908820200000022, 2020.

FIGUEIREDO, E. O. **Avaliação de povoamentos de teca (*Tectona grandis* L.f.) na microrregião do Baixo Rio Acre.** 301 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2005.

FIGUEIREDO FILHO, Afonso et al. **Crescimento e idade de espécies nativas regenerantes sob plantio de *Araucaria angustifolia* no Paraná.** Floresta e Ambiente, v. 24, p. e00104814, 2017.

GÓES, Geraldo Sandoval. **Curso: Avaliação Socioeconômica de Projetos.** 2019. Apresentação em Slide Share. 143 slides, Aula do programa de aperfeiçoamento de carreiras. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4650/2/Apresentação_Aulas%201%20a%205.pdf. Acesso em: 12 dez dez. 2023.

GOES, Thaís Bianchin; CHINELATO, Gressa Amanda. **Viabilidade econômico-financeira da cultura do café arábica na região da Alta Mogiana.** Revista IPecege, v. 4, n. 4, p. 31-39, 2018.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J. et al. **Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations.** Forest Ecology and Management, v. 301, p. 6-27, jan. 2013.

HIGA, Rosana Clara Victoria; MORA, Admir Lopes; HIGA, Antonio Rioyei. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural,** 2000.

IBÁ. **Relatório Anual 2022.** Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2023.

IMANÃ ENCINAS, J.; SILVA, G. F.; PINTO, J. R. R. **Idade e crescimento das árvores.** Brasília, DF: UNB, 2005. 40 p.

JOSINO, Maiara Neri. **Aplicação da metodologia Monte Carlo na determinação de rotação florestal sob condições de risco.** 2018.

JUNIOR, Luiz Moreira Coelho et al. **Análise de investimento de um sistema agroflorestal sob situação de risco.** Cerne, v. 14, n. 4, p. 368-378, 2008.

KASSAI, J.R.; KASSAI, S.; SANTOS, A.; ASSAF NETO, A. **Retorno de investimento: abordagem matemática e contábil do lucro empresarial.** São Paulo: Atlas, 1999.

LOPES, H. V. S. **Análise econômica dos fatores que afetam a rotação de povoamentos de eucaliptos.** 1990. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1990.

MACHADO, S.A. e FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria.** 2 ed. Guarapuava: Unicentro, 2006. 316 p.

MELO, Eliezer de Almeida et al. **Modelagem Não Linear Da Relação Hipsométrica e Do Crescimento Das Árvores Dominantes e Codominantes de Eucalyptus sp.** Ciência Florestal, v. 27, p. 1325-1338, 2017.

MOREIRA, JMMAP; OLIVEIRA, EB de. **Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais. Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental.** Brasília, DF: Embrapa, p. 11-20, 2017.

PEDROSO FILHO, Juarez Iensen et al. **Avaliação econômica de projetos de florestamento com Eucalyptus grandis Hill ex Maiden implantado sob diferentes espaçamentos.** Ciência Florestal, v. 28, n. 1, p. 240-248, 2018.

PEREIRA, A.R.S. et al. **Modelagem volumétrica para Eucalyptus urograndis no Município de Porto Grande, Amapá, Brasil.** Biota Amazônia, v.6, n.4, p.10-14, 2016.

PERES, A. A. C.; VÁSQUEZ, H. M.; SOUZA, P. M.; SILVA, F. C.; VILLELA, O. V.; SANTOS, F. C. **Análise financeira e de sensibilidade de sistemas de produção de leite em pastagem.** R. Bras. Zootec. Viçosa, v. 38, n. 10, p. 2072-2078, 2009.

PONCIANO, N. J.; SOUZA, P. M.; COSTA MATA, H. T.; VIEIRA, J. R.; MORGADO, I. F. **Análise de viabilidade econômica e de risco da fruticultura na região Norte Fluminense.** RER, Rio de Janeiro, v. 42, n. 4, p. 615-635, out/dez 2004.

REINER, D. A.; SILVEIRA, E. R.; STOCKMANN, F. **Diferentes espaçamentos em eucalipto como suprimento da propriedade e fonte de energia na agricultura familiar na região sudoeste do Paraná.** XIV SICITE UTFPR. Volume I. Seção Agronomia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.

- REIS, C. F. et al. **Cenário do setor de florestas plantadas no estado de Goiás.** 2017.
- RESENDE, R. R. et al. **Emprego de um modelo de crescimento e produção para determinação da rotação em povoamentos de Eucalipto.** Revista *Árvore*, v. 28, n. 2, p. 219–225, 2004.
- REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais.** 2ed. Viçosa: Universidade Federal Viçosa, 2013. 386 p.
- RODRIGUES, Maisa Isabela. **Categoria Profissional 3º Lugar: Análise financeira de investimentos em concessão florestal por meio de métodos determinísticos e estocásticos.** 2016.
- SALES, F.C.V. et al. **Ajustes de modelos volumétricos para o clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* cultivados no agreste de Pernambuco.** *Floresta*, v.45, n.4, p.663-670, 2015.
- SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J.N. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*.** *Scientia Forestalis*, v.65, p.120-129, 2004.
- SCHNEIDER, P.R.; FINGER C.A.G.; KLEIN, J.E.; et al. **Fundamentos de planejamento da produção para o manejo florestal de *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden e *Eucalyptus saligna* Smith.** Santa Maria: CEPEF/FATEC, 1988. 179p.
- SCHROEDER, Jocimari Tres et al. **O custo de capital como taxa mínima de atratividade na avaliação de projetos de investimento.** *Revista Gestão Industrial*, v. 1, n. 2, 2005.
- SCHUCHOVSKI, Mariana Smanhotto; ARCE, Julio Eduardo; DE OLIVEIRA, Edilson Batista. **Altura dominante e índice de sítio para *Pinus taeda* em dois polos de desenvolvimento florestal no sul do Brasil.** 2019.
- SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1998, 441p.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria Florestal: Modelos de crescimento e produção florestal.** Lavras: UFLA/FAEPE, p. 159-181, 2006.
- SILVA, Carolaini Campos da. **Métodos de análise de risco aplicados à sistemas agroflorestais: estudo de caso.** 2021.

SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; VALVERDE, S.R. **Economia Florestal**. 2^a ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 178p.

SNIF. **Florestas Plantadas 2022**. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas>>. Acesso em: 2 dez. 2023.

SOUZA, P.; SCHNORRENBERGER, D.; LUNKES, R. J. **Práticas de orçamento de capital predominantes na literatura internacional**. Revista Innovar, Bogotá, v. 26, n. 60, p. 103-116, 2016.

THOMAS, C. et al. **Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco**. Ciência Florestal, v.16, n.3, p.319-327, 2006.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield - Applications to Mixed Tropical Forests**. Oxon, UK, CAB International Publishing, 1994. 312 p.

ZEIDE, B. **Analysis of growth equations**. Forest Science, v.39, n.3, p. 594-616. 1993.