

Análise do custo do ciclo de vida como uma ferramenta de gestão de riscos no setor de silvicultura para a produção de madeira de eucalipto

GUSTAVO ALVES DE MELO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

THULIANY FERNANDES ARAÚJO PAES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

JAQUELINE SEVERINO DA COSTA

CAROLINA SOUZA JAROCHINSKI E SILVA

MARIA GABRIELA M PEIXOTO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

Introdução

A produção global de madeira para fins industriais aumentou 3,5 bilhões de m³ em 2000 para 3,9 bilhões de m³ em 2020, representando um incremento de 12% no período, sendo a Ásia e as Américas as principais produtoras respondendo por 30% e 27% da produção total, respectivamente. O Brasil se apresenta como o terceiro maior produtor, respondendo por 123 milhões de m³ (6% da produção mundial).

Problema de Pesquisa e Objetivo

O uso do custo do ciclo de vida (CCV) para a avaliação da viabilidade econômica ainda é muito limitado. Admitindo-se a existência desta lacuna na literatura abordada, o estudo buscou avançar a partir da consideração da seguinte questão de pesquisa: Qual o cenário de maior sustentabilidade econômica de um hectare de eucalipto quando submetido a diferentes regimes de manejo e condução da floresta? O objetivo deste estudo foi realizar uma Análise de Custo do Ciclo de Vida em uma empresa brasileira do setor florestal.

Fundamentação Teórica

A ACV permite listar todos os fluxos de entrada e saída dos materiais e energia de um sistema de produto, mensurando os impactos ambientais, sociais e econômicos desses fluxos, contribuindo com o ganho no subsídio de tomada de decisão. O conceito de ciclo de vida vem na contramão do retrabalho, pois ao invés de projetar soluções e ter que buscar investimentos para reparação dos danos feitos, essa metodologia busca analisar os impactos e reunir vantagens econômicas e ambientais, incluindo dados da matéria-prima e insumos, seu processamento e uso, até a deposição final.

Metodologia

O estudo apresentou quatro etapas, a saber: A Análise funcional correspondeu a definição do objetivo da análise, escopo e unidade funcional; A Análise de inventário se dedicou a apresentação de todos os custos de produção inerentes ao ciclo de vida do eucalipto do plantio a colheita; Já a Análise de impacto tratou da identificação dos principais custos do ciclo de vida e do estabelecimento de cenários que consideram as possibilidades de redução de custos; A etapa de interpretação foi realizada como pauta das discussões do estudo

Análise dos Resultados

Os resultados comprovaram a viabilidade do projeto tanto na AVE quanto para a maioria das iterações realizadas pela Simulação de Monte Carlo, ao todo foram realizadas 5.000 iterações. O cenário de Reforma/Condução foi o que obteve maior retorno de investimento. As variáveis preço da madeira e produção foram as que obtiveram maior impacto no retorno do projeto.

Conclusão

As limitações estiveram relacionadas à ocorrência de poucos estudos na literatura direcionados a produção de madeira de eucalipto e que utilizassem as metodologias propostos neste estudo e às escolhas dos autores com a consideração de uma taxa de desconto elevada. Logo, sugere-se a consideração de um novo estudo focado na técnica de Opções Reais com a abertura de novos cenários de análise, a replicação deste estudo em outros setores da economia de forma comparativa e a realização de estudos sobre a análise social e ambiental do ciclo de vida de produção da madeira de eucalipto.

Referências Bibliográficas

Li, J., Xiao, F., Zhang, L., & Amirkhanian, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1182-1206. Miraj, P., Berawi, M. A., & Utami, S. R. (2021). Economic feasibility of green office building: combining life cycle cost analysis and cost-benefit evaluation. *Building Research & Information*, 49(6), 624-638.

Palavras Chave

Análise de Custo do Ciclo de Vida, Simulação de Monte Carlo, Gestão de Riscos

Agradecimento a órgão de fomento

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento da pesquisa.

Análise do custo do ciclo de vida como uma ferramenta de gestão de riscos no setor de silvicultura para a produção de madeira de eucalipto

1. Introdução

A produção global de madeira para fins industriais aumentou 3,5 bilhões de m³ em 2000 para 3,9 bilhões de m³ em 2020, representando um incremento de 12% no período, sendo a Ásia e as Américas as principais produtoras respondendo por 30% e 27% da produção total, respectivamente (FAO, 2022). O Brasil se apresenta como o terceiro maior produtor, respondendo por 123 milhões de m³ (6% da produção mundial) (da Silva Lopes et al., 2022; FAO, 2022). Neste contexto, a produção de madeira de eucalipto se destaca pela sua versatilidade e alto rendimento com períodos menores de rotação (período entre plantio e colheita entre 5 e 7 anos) comparado a outras espécies (FAO, 2022). Os impactos desta modalidade de produção na economia são perceptíveis e expressivos, com contribuições de mais de R\$ 80 bilhões de movimentações no caso brasileiro, representando cerca de 1,3% de todo o PIB do país (da Silva Lopes et al., 2022; FAO, 2022).

A silvicultura é uma parte importante para a empresa florestal, não só pela formação dos ativos florestais, mas porque também apresenta custos elevados e alta demanda de recursos (Saosee et al., 2020; Layton et al., 2021). De acordo com a Embrapa (2016), para uma produção florestal mais sustentável a silvicultura deve envolver um sistema de baixo impacto no solo, água, biodiversidade, carbono e no uso de agrotóxicos. Certificações como Forest Stewardship Council (FSC) e o Programa Brasileiro de Certificação Florestal (Cerflor) são muito usuais no meio florestal para validar as práticas socioeconômicas e ambientais das corporações (EMBRAPA, 2016). Mas tendo em vista o maior aprofundamento e rastreabilidade de toda cadeia produtiva, maior aprofundamento nos pontos de impactos e relevância dos mesmos, considerando a perspectiva do ciclo de vida do produto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) desponta como uma técnica inovadora para mensurar a sustentabilidade dos sistemas de produção (Rios et al., 2019; Kumar et al., 2020; Santolini et al., 2022; Balcioglu et al., 2023).

A ACV permite listar todos os fluxos de entrada e saída dos materiais e energia de um sistema de produto, mensurando os impactos ambientais, sociais e econômicos desses fluxos, contribuindo com o ganho no subsídio de tomada de decisão (ABNT, 2009a; Li et al., 2019; Rai et al., 2022; Farjana et al., 2023). O conceito de ciclo de vida vem na contramão do retrabalho, pois ao invés de projetar soluções e ter que buscar investimentos para reparação dos danos feitos, essa metodologia busca analisar os impactos e reunir vantagens econômicas e ambientais, incluindo dados da matéria-prima e insumos, seu processamento e uso, até a deposição final (Bajwa et al., 2019; Sahoo et al., 2019; Perdomo et al., 2021; Miraj et al., 2021).

A metodologia compreende as seguintes etapas: definição dos objetivos e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação (ABNT, 2009a; 2009b; Faraca et al., 2019; He et al., 2020). Sendo o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) uma etapa de grande relevância por possibilitar a identificação dos pontos limitantes de avaliação do processo, permitindo maior consistência dos dados e viabilizando a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis (Li et al., 2019; Di Maria et al., 2020). Segundo (Perdomo et al., 2021) trata-se da fase responsável pelos levantamentos quantitativos de todas as entradas (materiais, energia e recursos) e saídas (produtos, subprodutos, emissões etc.).

No setor florestal é possível observar estudos sobre o desempenho ambiental na produção de painel de madeira (MDP) (Silva, 2012; Rai et al., 2022; Balcioglu et al., 2023), impactos ambientais da colheita florestal, fertilização e transporte da madeira (Morales et al., 2015), avaliação ambiental de sistemas convencionais de plantação de eucalipto para a indústria de papel e celulose (da Silva Lopes et al. 2022), avaliação da emissão de CO₂ na produção da madeira de eucalipto para produção de energia (Barrantes et al., 2016), avaliação da sustentabilidade de edificações de eucalipto (Pešta et

al., 2020), avaliação de emissão de CO₂ e energia incorporada em madeira serrada para a construção civil, desde plantios florestais (eucalipto e pinus) até canteiros de obra (Punhagui;John, 2022). Logo, é possível observar que o desempenho ambiental do ciclo de vida tem sido amplamente analisado na literatura por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV), no entanto, o uso do custo do ciclo de vida (CCV) para a avaliação da viabilidade econômica ainda é muito limitado (da Silva Lopes et al., 2022; Olba-Zięty et al., 2022; Balcioglu et al., 2023).

Admitindo-se a existência desta lacuna na literatura abordada, o estudo buscou avançar a partir da consideração da seguinte questão de pesquisa: Qual o cenário de maior sustentabilidade econômica de um hectare de eucalipto quando submetido a diferentes regimes de manejo e condução da floresta? De acordo com a FAO (2022), Sahoo et al. (2019), Carlqvist et al., (2020) e da Silva Lopes et al. (2022) a demanda mundial de madeira é crescente e a maior parte dos países apresentam escassez do recurso, sendo assim, é de suma relevância a avaliação de formas de manejo que tragam maior viabilidade econômica para o negócio de forma a evitar e combater a exploração de recursos madeireiros nativos para suprir essa demanda em expansão.

Por fim, o objetivo deste estudo foi realizar uma Análise de Custo do Ciclo de Vida em uma empresa brasileira do setor florestal. O estudo tende a contribuir com a área de silvicultura a partir da combinação de técnicas de avaliação de cenários de investimento no plano econômico, tais como, a Análise de Viabilidade Econômica (AVE) e Simulação de Monte Carlo. Espera-se que este estudo represente um ponto de partida para outros estudos da área, trazendo contribuições tanto teóricas quanto práticas. Como importante contribuição teórica pode ser mencionada a análise de cenários sob as perspectivas determinística e probabilística proporcionando uma visão holística do processo. As contribuições sociais emergem do contexto de sustentabilidade econômica, a fim de promover um ambiente de maior responsabilidade social, ambiental e econômica para a população.

2. Metodologia

2.1 Custo do Ciclo de Vida

A Análise do Custo do Ciclo de Vida trata-se de uma metodologia de mensuração dos custos totais de produção inerentes ao ciclo de vida de produtos, projetos e/ou serviços (Li et al., 2019; Miraj et al., 2021). Nesta perspectiva, este estudo avançou na consideração de quatro etapas, a saber, Análise funcional, Análise de inventário, Análise de impacto e Interpretação.

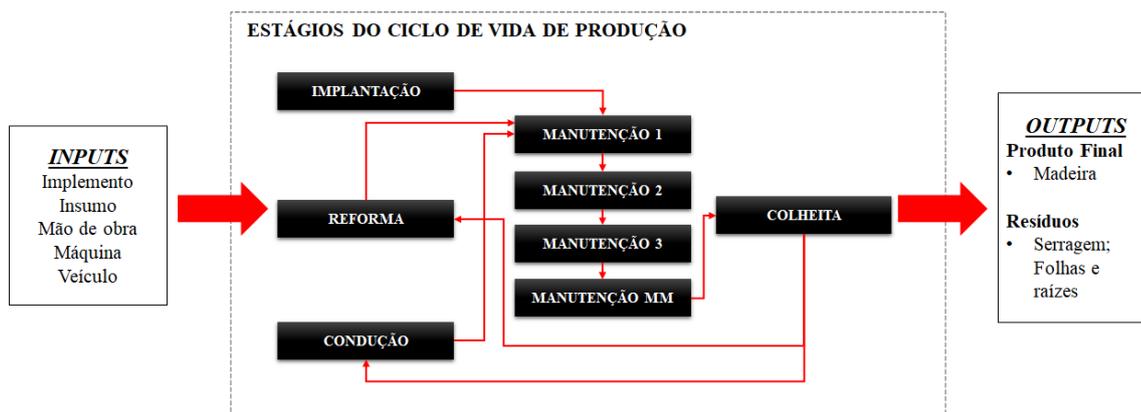
2.1.1 Objetivo, escopo e unidade funcional

O objetivo desta análise foi determinar os custos do ciclo de vida de produção do eucalipto do plantio a colheita. Para tanto, podem ser listados os seguintes objetivos específicos:

- i. Apresentar os custos de produção do eucalipto por estágio do ciclo de vida;
- ii. Identificar os principais custos de produção;
- iii. Propor cenários alternativos a partir de simulações realizadas a fim de promover a redução de custos do processo.

O escopo de análise considerou os estágios de produção do “berço a colheita” da empresa, ou seja, os estágios de implantação, reforma, condução, manutenções e colheita, conforme representado na Figura 1.

Figura 1 – Escopo de Análise do Custo do Ciclo de Vida para a produção de eucalipto



Fonte: Autores (2023)

Cada um dos sistemas de manejos silviculturais: implantação, reforma, condução e manutenções são compostos por uma série de atividades de forma a garantir o crescimento e desenvolvimento desses plantios, sendo que implantação é realizada em áreas onde há a conversão do uso do solo, a reforma é realizada em áreas onde a floresta está no segundo ciclo, ou seja, já foi realizado o plantio e corte da floresta naquela área e o novo plantio é realizado na entrelinha do primeiro e a condução é realizada em áreas onde após o corte do primeiro ciclo o gestor da área opta por conduzir a brotação advinda das cepas (tocos) que permanecem na área. As manutenções se dão durante todo o ciclo da floresta e em todos os três tipos de manejo, são operações que visam garantir a qualidade e melhor desenvolvimento das plantas, sendo que a Manutenção 1 ocorre entre o primeiro e segundo ano de vida do plantio, a Manutenção 2 entre o segundo e terceiro ano, a Manutenção 3 entre o terceiro e quarto ano e a Manutenção MM entre o sexto e sétimo ano, ou seja, pré-corte. A colheita é normalmente realizada quando o plantio completa sete anos, sendo utilizado como maquinário para operação harvester (corte e traçamento) e forwarder (baldeio – arraste para a margem da estrada).

A Figura 2 contempla a combinação de quatro cenários possíveis para a produção de eucalipto, considerando 2 ciclos da cultura. Cada atividade consome um período de 7 anos, totalizando um período de 14 anos por cenário analisado. Assim, foram estimados os custos totais de produção para os cenários: Implantação e Reforma, Implantação e Condução, Reforma e Condução, Reforma e Reforma.

Figura 2 – Cenários considerados para a Análise do Custo do Ciclo de Vida



Fonte: Autores (2023)

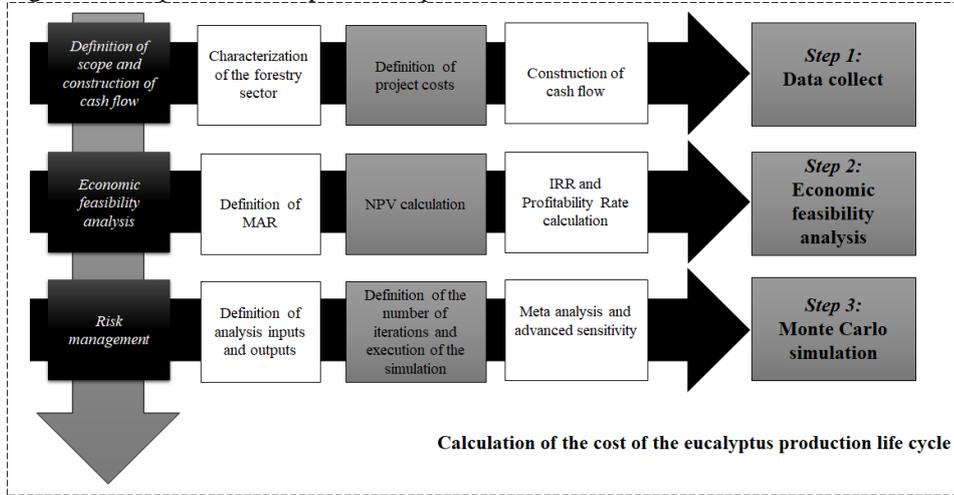
A unidade funcional utilizada nos cálculos dos custos de produção foi definida como 1 hectare de eucalipto cultivado no período de 14 anos, conforme a combinação de cenários estipulada na Figura 2. Assim, todos os custos estimados se encontram na mesma unidade, R\$/ha.

2.1.2 Cálculo do custo do ciclo de vida

A Análise de Viabilidade Econômica (AVE) trata-se de uma técnica de avaliação de cenários de investimento para a realização de projetos diversos. Para tanto, a priori, necessita-se que haja uma mensuração de todos os custos envolvidos no projeto para que seja possível a construção do fluxo de

caixa projetado. O fluxo de caixa corresponde a uma representação gráfica de todas as entradas, saídas e retornos ocorrentes em um período pré-determinado de análise. Com base nestas informações a Figura 3 explana as etapas de cálculo do custo do ciclo de vida para o projeto em questão.

Figura 3 – Mapa conceitual para as etapas de cálculo do ciclo de vida



Fonte: Autores (2023)

De acordo com a Figura 3, inicialmente foi realizada a etapa de coleta de dados que abordou uma contextualização para melhor entendimento do setor de silvicultura, a mensuração de todos os custos envolvidos no projeto bem como a construção do fluxo de caixa. Foram construídos um fluxo de caixa para cada um dos cenários elencados na Figura 2 com um período de 14 anos cada. A segunda etapa contemplou a Análise de Viabilidade Econômica (AVE) partindo da definição de uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Segundo Monteiro et al. (2021), a TMA corresponde ao percentual mínimo que um investidor se propõe a ganhar ao realizar um investimento. Para fins de cálculo da TMA do projeto foram somados o Custo de Oportunidade e o Risco do Negócio à Taxa Selic. O custo de oportunidade trata-se do valor de remuneração de capital observado para outras alternativas de investimento. Já o risco do negócio pode ser determinado pelo próprio mercado e estipulação de cenários. A taxa Selic é a taxa básica de juros utilizada para a realização de investimentos.

Desta forma, a Taxa Mínima de Atratividade foi construída com base em uma taxa real ou efetiva (i), partindo-se de um valor (taxa nominal) composta pelos pilares: custo de oportunidade (5%); risco do negócio (5%); taxa Selic (13,25% - em agosto/2023). Sendo assim, a taxa nominal (r) considerada foi de 23,25% a.a. com um número de períodos (M) de 12 meses por ano. Realizando os cálculos de acordo com a equação (1):

$$i = \left(1 + \frac{r}{M}\right)^M - 1 \quad (1),$$

obteve-se uma taxa real (i) de 25,89% a.a. Considerando uma taxa de inflação (θ) de 3,99%, que corresponde ao IPCA acumulado de 12 meses registrado até julho/2023 pelo IBGE (2023), foi calculada a Taxa de juros sem inflação (i') conforme a equação (2), onde i é a taxa real ou efetiva e θ é a taxa da inflação:

$$i' = i - \theta - (i * \theta) \quad (2).$$

Assim, a TMA utilizada neste estudo correspondeu ao valor da Taxa de juros sem inflação (i'), no caso, $i' = 20,87\%$ a. a.

Posteriormente, iniciaram-se os cálculos das técnicas do Valor Presente Líquido (VPL) conforme a equação (3):

$$VPL = FC_1 + \sum_{n=1}^k \frac{FC_{n+1}}{(1 + K)^n} = 0; n = 1, 2, \dots, k \quad (3),$$

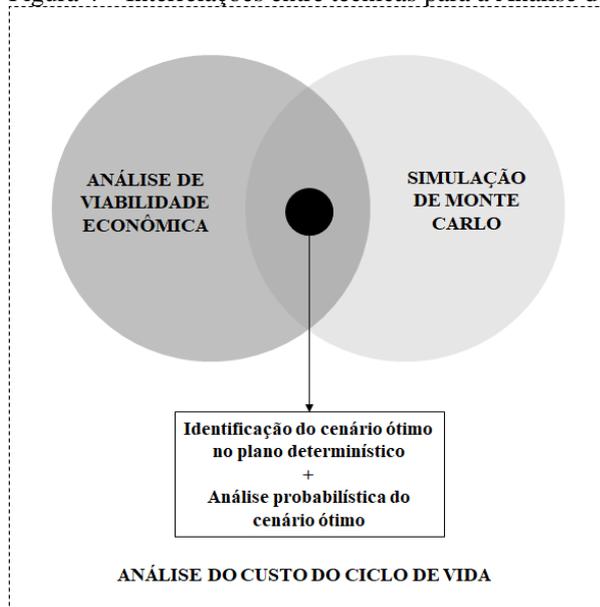
onde o VPL é o valor presente líquido; FC_1 representa fluxo de caixa na data zero; FC_n representa o fluxo de caixa na n -ésima data; n é o prazo de análise do projeto; K é a Taxa de Desconto (TD) ou Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

Em seguida, foram estimadas a Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa de Lucratividade do projeto. Segundo Monteiro et al. (2021), a TIR trata-se do percentual de remuneração do projeto, sendo interessantes valores de $TIR \geq TMA$, que indicam a aceitação da alternativa de investimento. Vale ressaltar que a TIR pode ser definida como a taxa de desconto, real e não negativa para a avaliação de viabilidade de projetos. Já a taxa de lucratividade do projeto corresponde ao valor de remuneração de cada unidade monetária investida no projeto.

A terceira etapa de cálculo do custo do ciclo de vida tratou-se da gestão de riscos correspondente a alternativa de investimento mais rentável indicada pela AVE. Logo, foram identificados os *inputs* e *outputs* para a realização da simulação de Monte Carlo. Os *inputs* representam indicadores determinísticos da análise tradicional e que no plano probabilístico são representados por distribuições de probabilidade. Os *outputs* representam indicadores de saída do projeto como, por exemplo, o VPL, TIR e Taxa de Lucratividade. A simulação de Monte Carlo foi realizada em um total de 5000 iterações.

A Figura 4 representa um esquema conceitual das interrelações existentes entre as técnicas utilizadas para o cálculo do custo do ciclo de vida. Percebe-se a ligação entre as três técnicas bem como o avanço na consideração da transição do plano determinístico de análise para o plano probabilístico. Entre as técnicas AVE e simulação de Monte Carlo se destaca a identificação de cenário ótimo e avanço no plano probabilístico com a identificação dos indicadores mais impactantes nos outputs de análise.

Figura 4 – Interrelações entre técnicas para a Análise do Custo do Ciclo de Vida



Fonte: Autores (2023)

2.1.3 Inventário do ciclo de vida

Esta etapa do estudo se dedica ao desdobramento do inventário do ciclo de vida para a produção do eucalipto. A Tabela 1 apresenta os custos por estágio de ciclo de vida, sendo estes os estágios de Implantação, Reforma, Condução, Manutenção 1, Manutenção 2, Manutenção 3, Manutenção MM e Colheita.

Tabela 1 – Inventário do ciclo de vida

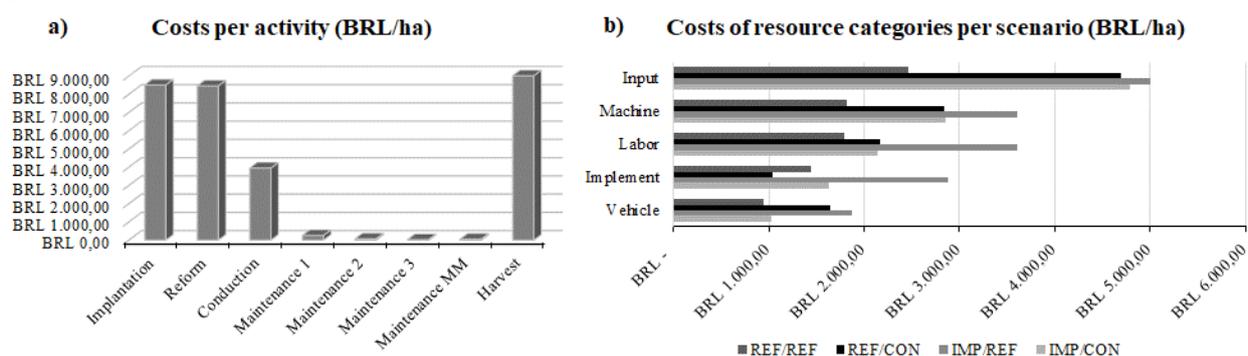
Cenário 1 (Imp/Ref)	Cenário 2 (Imp/Cond)	Cenário 3 (Ref/Cond)	Cenário 4 (Ref/Ref)
---------------------	----------------------	----------------------	---------------------

Ano	Fase	R\$/ha	Fase	R\$/ha	Fase	R\$/ha	Fase	R\$/ha
1	Implantação	R\$ 8.497,91	Implantação	R\$ 8.497,91	Reforma	R\$ 8.446,44	Reforma	R\$ 8.446,44
2	Manutenção 1	R\$ 249,76						
3	Manutenção 2	R\$ 63,63						
4	Manutenção 3	R\$ 23,46						
5	Manutenção MM	R\$ 45,10						
6	Manutenção MM	R\$ 45,10						
7	Colheita	R\$ 9.045,10						
Custo Total		R\$ 17.970,06	Custo Total	R\$ 17.970,06	Custo Total	R\$ 17.918,59	Custo Total	R\$ 17.918,59
Receita		R\$ 47.250,00	Receita	R\$ 47.250,00	Receita	R\$ 47.250,00	Receita	R\$ 47.250,00
Ano	Fase	R\$/ha	Fase	R\$/ha	Fase	R\$/ha	Fase	R\$/ha
8	Reforma	R\$ 8.446,44	Condução	R\$ 3.945,57	Condução	R\$ 3.945,57	Reforma	R\$ 8.446,44
9	Manutenção 1	R\$ 249,76						
10	Manutenção 2	R\$ 63,63						
11	Manutenção 3	R\$ 23,46						
12	Manutenção MM	R\$ 45,10						
13	Manutenção MM	R\$ 45,10						
14	Colheita	R\$ 9.045,10						
Custo Total		R\$ 17.918,59	Custo Total	R\$ 13.417,72	Custo Total	R\$ 13.417,72	Custo Total	R\$ 17.918,59
Receita		R\$ 47.250,00	Receita	R\$ 47.250,00	Receita	R\$ 47.250,00	Receita	R\$ 47.250,00

Fonte: Autores (2023)

Ainda conforme a Tabela 1, ressalta-se a ocorrência de atividades repetitivas ao longo do ciclo de vida de produção do eucalipto. Isso demonstra a importância de tais atividades para a manutenção de um padrão de produção eficiente. Neste sentido podem ser listadas como atividades críticas do ciclo de vida o combate à formiga (manual e mecanizado) e a adubação. Em uma análise mais sucinta, a Figura 5 (a) apresenta a somatória de todos os custos por estágio do ciclo de vida, já a Figura 5 (b) apresenta estes custos por categoria de recurso separados de acordo com os cenários abordados no estudo.

Figura 5 – Custos do ciclo de vida por atividade e por categorias de recursos



Fonte: Autores (2023)

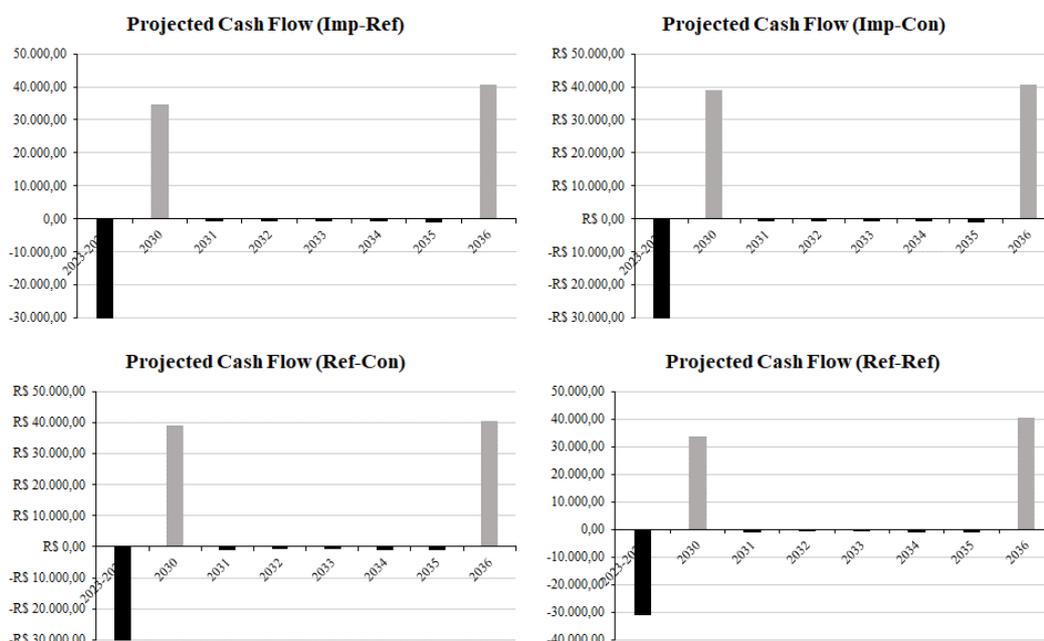
A Figura 5 (a) aponta os estágios de implantação, reforma e colheita como os grandes detentores dos custos do ciclo de vida de produção do eucalipto, com custos de R\$ 8.497,91; R\$ 8.446,44 e R\$ 9.000,00 respectivamente. Por outro lado, de acordo com a Figura 5 (b) pode-se inferir que as maiores fontes de custos estão relacionadas ao consumo de insumos de produção em todos os cenários analisados. Além disso, o cenário de Implantação/Reforma foi o que obteve maior custo em ambas as análises.

3. RESULTADOS

3.1 Análise Determinística: Análise de Viabilidade Econômica (AVE)

Com base nos custos estimados para o ciclo de vida de produção do eucalipto, pôde-se desenvolver a Figura 6 que ilustra os fluxos de caixa projetados para cada cenário analisado. As entradas se referem à venda da madeira colhida ao final de 7 e 14 anos, sendo considerada uma média de produção 300 m³/ha e um preço médio de R\$ 157,50/m³. As saídas se referem a distribuição anual de todos os custos estimados no inventário do ciclo de vida subdivididos por cenário. Já o retorno corresponde à diferença entre entradas e saídas por período. Vale ressaltar que o investimento inicial considerado foi correspondente a todos os gastos efetuados nos sete primeiros anos do fluxo até a primeira entrada de caixa, o que corresponde aos gastos com aquisição de mudas para o plantio (um total de 1100 mudas por um preço de R\$ 1,20 cada), custos de reforma, manutenções e colheita, arrendamento e capital de giro. O capital de giro contemplou os gastos referentes ao primeiro ano para cobertura de impostos (IRPF, Funrural, Taxa Florestal e ICMS), um total de 16% que incide anualmente sobre a receita bruta.

Figura 6 – Fluxos de caixa projetado por cenário



Fonte: Autores (2023)

Posteriormente, procederam-se os cálculos do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Taxa de Lucratividade e Payback descontado, considerando uma TMA de 23,25% a.a. Desta forma, a Tabela 2 representa os valores estimados para estes indicadores em cada cenário de análise.

Tabela 2 – Análise de Viabilidade Econômica por cenário

Indicators	Imp-Ref	Imp-Con	Ref-Con	Ref-Ref
VPL	R\$ 6.121,16	R\$ 9.844,84	R\$ 9.896,31	R\$ 5.473,83
TIR	30,62%	38,35%	38,48%	29,44%
Taxa de Lucratividade	2,27	2,42	2,42	2,25
Payback descontado (anos)	8,086	7,795	7,794	7,920

Fonte: Autores (2023)

Com base nos valores observados na Tabela 2 pode-se perceber que todos os cenários apresentaram viabilidade econômica, uma vez que obtiveram um VPL positivo e não nulo, bem como

uma TIR superior a TMA pré-definida. Todavia, o melhor cenário correspondeu ao sistema de reforma e condução, que obteve os maiores valores para o VPL e TIR. Assim, o estudo avançou para a próxima etapa do cálculo do ciclo de vida, que representa a análise no plano probabilístico a partir da Simulação de Monte Carlo. Para tanto foram identificados os *inputs* e *outputs* do processo para a realização desta próxima etapa. Os *inputs* corresponderam aos indicadores determinísticos da AVE, a saber, Preço da madeira (R\$/m³), Produção (R\$/ha), Área de cultivo (ha), Custos de reforma (R\$/ha), Custos de Manutenção 1 (R\$/ha), Custos de Manutenção 2 (R\$/ha), Custos de Manutenção 3 (R\$/ha), Custos de Manutenção MM (R\$/ha), Custos de Condução (R\$/ha), Custos de Colheita (R\$/ha), IPCA acumulado (%), TMA (%), Arrendamento (R\$/ha/ano) e Markup (%). Já os *outputs* contemplaram os indicadores de viabilidade econômica VPL (Ref-Con), TIR (Ref-Con) e Taxa de Lucratividade (Ref-Con). Cabe lembrar que esta simulação se baseou no cenário ótimo identificado pela AVE para ajustes nos parâmetros de distribuição de probabilidade.

3.2 Análise Probabilística: Simulação de Monte Carlo

A fim de se realizar a simulação de Monte Carlo para o contexto de análise é necessário, após a identificação dos *inputs* e *outputs* do processo, a definição dos parâmetros e distribuições de probabilidade de cada *input* considerado. As distribuições de probabilidade foram escolhidas com base ao melhor ajuste observado em cada variável considerada, conforme representado na Tabela 3.

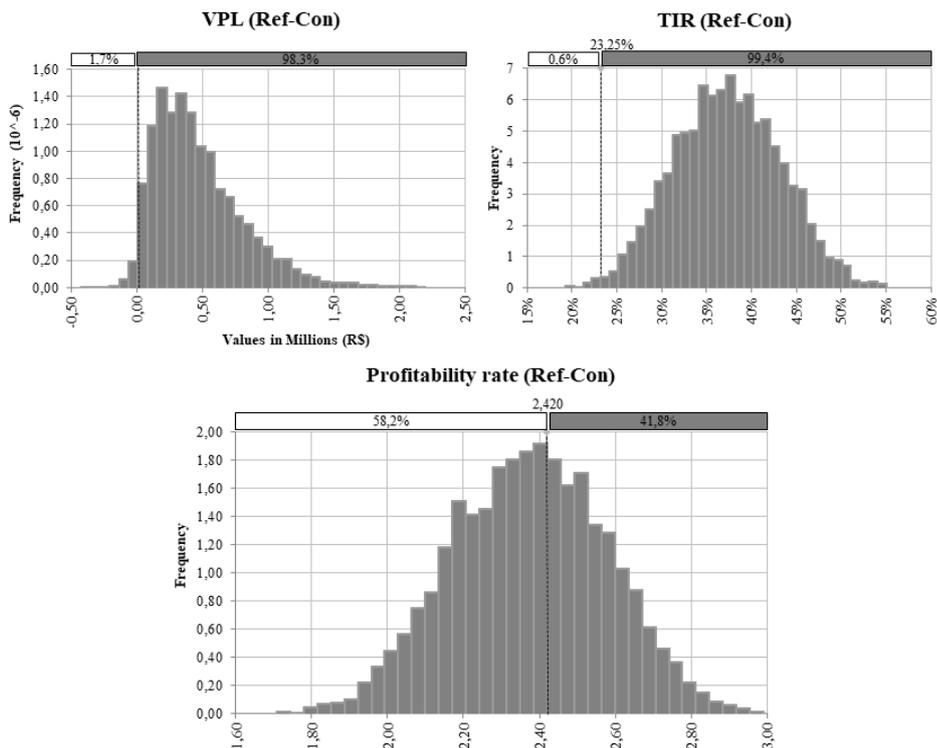
Tabela 3 – Distribuição de probabilidade e parâmetros dos inputs

Input	Distribuição de probabilidade	Parâmetro
Preço da madeira (R\$/m ³)	Pert	(140;157,5;170)
Produção (m ³ /ha)	Pert	(250;300;350)
Área de cultivo (ha)	Triangular	(1;50;100)
Custos de reforma (R\$/ha)	Pert	(7500;8446,44;9500)
Custos de manutenção 1 (R\$/ha)	Pert	(150;249,76;350)
Custos de manutenção 2 (R\$/ha)	Pert	(50;63,63;75)
Custos de manutenção 3 (R\$/ha)	Pert	(15;23,46;30)
Custos de manutenção MM (R\$/ha)	Pert	(30;45,10;55)
Custos de condução (R\$/ha)	Pert	(3000;3945,57;4500)
Custos de colheita (R\$/ha)	Pert	(8500;9045,10;9500)
IPCA acumulado (%)	Pert	(0,03;0,0399;0,045)
TMA (%)	Pert	(0,1325;0,2325;0,35)
Arrendamento (R\$/ha/year)	Triangular	(500;600;1000)
Markup (%)	Pert	(0,05;0,1;0,15)

Fonte: Autores (2023)

Com base nestas informações foi possível a realização da simulação de Monte Carlo com 5.000 iterações, conforme elucidado na Figura 7.

Figura 7 – Histogramas probabilísticos resultantes da Simulação de Monte Carlo para o cenário ótimo

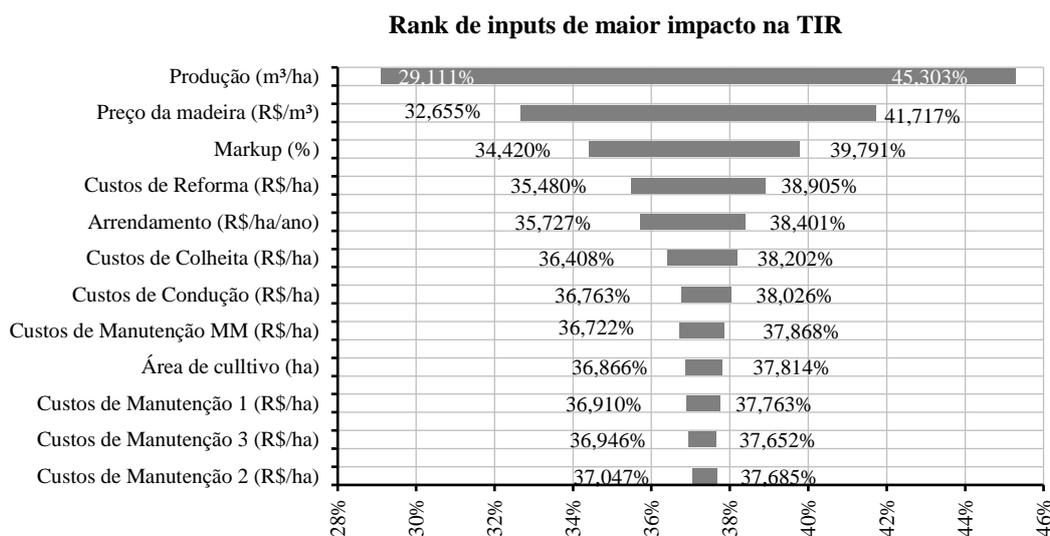


Fonte: Autores (2023)

De acordo com a Figura 7, os resultados da simulação de Monte Carlo apontaram uma probabilidade de 98,3% de haver um VPL positivo e diferente de zero. No caso da TIR, há uma probabilidade de 99,4% desta ser superior ao valor da TMA (23,25%) verificado na AVE. Já para a Taxa de Lucratividade, a simulação indicou uma probabilidade de 41,8% de ocorrência de taxas de lucratividades superiores à taxa de lucratividade indicada pela AVE (2,42).

A partir destes resultados, busca-se pela otimização dos custos de ciclo de vida de produção do eucalipto. Para tanto, em uma nova análise da Figura 8 pode-se identificar com clareza quais inputs do processo impactam de maneira mais expressiva a TIR do projeto.

Figura 8 – Impacto de *inputs* da Simulação de Monte Carlo na TIR para o cenário ótimo

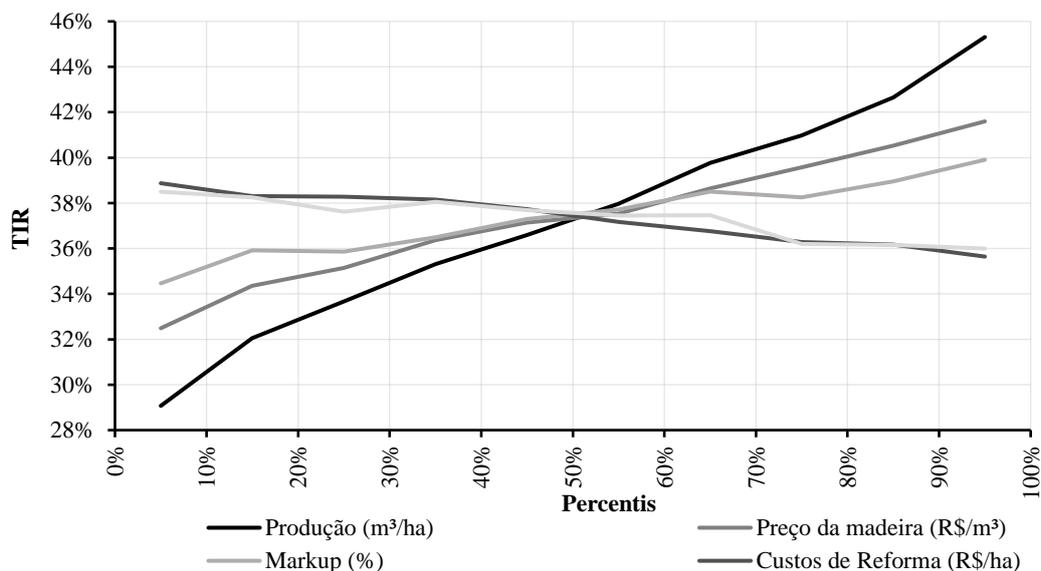


Fonte: Autores (2023)

Segundo a análise da Figura 8, as variáveis mais impactantes na TIR do projeto foram os *inputs*: produção, preço da madeira, markup, custos de reforma, arrendamento, custos de colheita, custos de condução, custos de manutenção MM, área de cultivo, custos de manutenção 1, manutenção 3 e manutenção 2, respectivamente. No entanto, pensar em alternativas para a maximização do preço da madeira é uma alternativa inviável, uma vez que este indicador é dependente de questões externas à empresa, seguindo as flutuações do mercado. Além disso, pensar em alternativas de maximização de produção incorre em aumento de custos, devido a adição de maiores quantidades de implementos, insumos, mão de obra, entre outros. Assim, este estudo avança em sua análise de custos do ciclo de vida a fim de identificar os maiores custos para um cenário de Reforma/Condução e para a proposição de alternativas de tomada de decisão que considerem a redução destes custos.

Vale ressaltar a correlação existente entre estes principais inputs/indicadores e a TIR. Na análise da Figura 9 podem ser visualizadas inclinações ascendentes para os inputs produção, preço e markup e inclinações descendentes para os inputs custos de reforma e arrendamento. Isso indica que com base na simulação realizada, à medida que eram efetuados incrementos nos inputs produção, preço e markup foram verificados aumentos na TIR.

Figura 9 – Impacto de inputs na TIR por percentil considerado



Fonte: Autores (2023)

Trabalhando um pouco mais estes inputs a partir de uma análise de sensibilidade avançada podemos realizar alguns apontamentos. Por exemplo, caso o produtor consiga melhores preços da madeira na ordem de R\$ 173,25/m³, a TIR seria de 46%. Caso seja realizado investimentos em produtividade e a produção seja aumentada para a ordem de 345 m³/ha, a nova TIR seria de 50%. Caso os custos de reforma sejam reduzidos de R\$ 8.446,44 para R\$ 7.179,47 a TIR seria de 42%. Por outro lado, se os custos de condução forem reduzidos de R\$ 3.945,57 para R\$ 3.156,46 a TIR seria de 40%. No caso dos custos de colheita, caso haja reduções de 10% a TIR será aumentada em 3%. Em relação aos inputs arrendamento e markup, caso ocorram variações destes valores para R\$ 540,00 e 10%, o novo valor da TIR seria de 39%.

Por fim, foi realizada uma simulação em um cenário específico onde a TIR considerada foi de 46,50%, o dobro da TMA. Assim, para que esta meta seja atingida seriam necessárias realizar variações nos inputs considerados. A Tabela 4 representa os novos valores de alguns dos inputs de maior impacto na TIR para o alcance desta meta.

Tabela 4 – Análise de Meta

Inputs	Meta para uma TIR=46,5%
Preço da madeira (R\$/m ³)	R\$ 175,65
Produção (m ³ /ha)	336,166
Markup (%)	21%
Custos de Reforma (R\$/ha)	R\$ 5.387,22
Custos de Colheita (R\$/ha)	R\$ 6.254,04

Fonte: Autores (2023)

A análise da Tabela 4 é importante, pois serve de apoio para que o investidor possa tomar decisões em pontos estratégicos do sistema de produção a fim de reduzir custos, elevar a produção ou até trabalhar por uma política de preços mais rentável. No caso do aumento da produção, podem ser incorporadas técnicas inovadoras de cultivo e tratamento do solo que viabilizam a maior produtividade do eucalipto.

4. DISCUSSÃO

Este estudo pautou-se na metodologia de análise do custo do ciclo de vida para a avaliação dos estágios de produção de madeira de eucalipto do plantio a colheita. Vale ressaltar a existência de alguns debates na área de ACV e que discorrem sobre o desempenho econômico da produção de madeira (Saosee et al., 2020; Layton et al., 2021; Rai et al., 2022; Balcioglu et al., 2023), e poucos estudos sobre a produção de eucalipto especificamente (da Silva Lopes et al., 2022). Os resultados demonstraram a viabilidade econômica para o empreendimento em todos os cenários analisados, no entanto, pontos de melhoria podem ser considerados a fim de obter menores custos de produção. Nesta perspectiva o estudo avança para a última etapa de análise do ciclo de vida que corresponde à fase de interpretação. Busca-se a partir daí encontrar respostas para algumas premissas do projeto bem como integrar este estudo a literatura existente como uma forma de contribuição teórica para o campo.

Alguns estudos na área como o de Li et al. (2019), Sahoo et al. (2019) e Perdomo et al. (2021) apontam a metodologia de ACV como uma possibilidade de medida científica da sustentabilidade e desempenho ambiental de um produto. Em sua obra Sahoo et al. (2019) destaca o estágio de fabricação do produto que tende a apresentar os maiores impactos ambientais e os estágios de manejo florestal e logística como os de maior impacto econômico. Desta maneira, este estudo foi além da metodologia adotada por Sahoo et al. (2019), desdobrando os custos de cada estágio de manejo florestal para a produção de madeira de eucalipto e identificando quais são as maiores fontes de custos.

Em seu estudo da Silva Lopes et al. (2022) explanam uma alternativa ambiental e economicamente viável para a produção de madeira de eucalipto. Trata-se da inserção da atividade agropecuária em áreas dedicadas ao manejo florestal. Seu estudo indicou a redução do consumo de insumos em 35% e aumento da receita bruta em um cenário formado pela integração lavoura-pecuária-floresta comparado ao cenário de implantação e reforma, uma vez que promove retornos econômicos imediatos e contribui para o sequestro líquido de CO₂. Da Silva Lopes et al. (2022) convergem com Sahoo et al. (2019) ao identificar os custos logísticos como uma das maiores fontes de custo para o ciclo de produção da madeira de eucalipto. No entanto, neste estudo o custo de transporte foi desconsiderado por se tratar de uma atividade externa a empresa analisada, ou seja, o produto final corresponde a madeira cortada e descascada.

Considerando as etapas de cálculo do custo do ciclo de vida adotadas, na Análise de Viabilidade Econômica foi considerada uma taxa mínima de atratividade de 23,25% a.a. No entanto, como trata-se de uma variável determinística a análise resultante se torna fixa e, portanto, a viabilidade comprovada nesta etapa é compatível ao tempo presente. Nesta ocasião, a TMA utilizada considerou um risco do negócio e um custo de oportunidade de apenas 5% a.a. cada. Estes valores se justificam na medida que o setor de silvicultura apresenta custos razoáveis para a produção de madeira (Fauzi et al., 2021; da Silva Lopes et al., 2022; Rai et al., 2022), que acabam se diluindo ao longo dos

14 anos considerados para o fechamento do ciclo de vida. Além disso, o produto final corresponde à madeira descascada que apresenta muitas possibilidades de aplicação no mercado de modo geral, seja na indústria de produção de bioetanol (Carlqvist et al., 2020), celulose (Sahoo et al., 2019; Olba-Zięty et al., 2022), construção civil ou de combustíveis fósseis (Pešta et al., 2022), por exemplo. Também foi considerada uma taxa Selic de 13,25% a.a. que corresponde a taxa básica de juros praticada no período.

Logo, a partir dos quatro cenários elencados (Implantação-Reforma; Implantação-Condução; Reforma-Condução e Reforma-Reforma) os resultados indicaram o sistema Reforma-Condução como cenário ótimo. Isso se deve a combinação de uma sequência de atividades do processo que incorrem em menores custos totais de produção. Uma vez que na AVE não se admite a possibilidade de variações para o cálculo do VPL, por exemplo, as variáveis preço e produção foram constantes e compuseram as entradas do fluxo de caixa. Outrossim, os cenários que consideram o estágio de implantação apresentaram maiores custos, uma vez que é uma fase em que há um volume maior de gastos relacionados às categorias de insumos e máquinas no processo (Sahoo et al., 2019; da Silva Lopes et al., 2022). Dentre os estágios de implantação, reforma e condução, a condução representa o estágio de produção de menor custo de produção.

Dando sequência ao custeio do ciclo de vida, na etapa da Simulação de Monte Carlo foram considerados como *inputs* da técnica, o preço da madeira, a produção, a área de cultivo, o arrendamento, o IPCA acumulado, TMA e o custo relacionado a cada um dos estágios de produção da madeira de eucalipto. Esta análise foi bastante válida para a mensuração de impacto de variáveis do processo no retorno econômico do projeto. Logo, os resultados evidenciaram o preço e produção da madeira como duas das variáveis mais impactantes no VPL, TIR e Taxa de Lucratividade do projeto. Sabe-se que o preço da madeira é influenciado por questões externas ao projeto que fogem do domínio do investidor (Sahoo et al., 2019; da Silva Lopes et al., 2022; Rai et al., 2022), todavia, esta informação é extremamente proveitosa no sentido de informar a proporção de impacto do preço no retorno do projeto, ajudando o investidor em tomadas de decisão ao ocorrer flutuações no valor da variável preço ao longo do ano. Ou seja, o investidor pode antecipar o conhecimento de sua margem de lucro ao considerar as variações no preço da madeira e decidir o melhor momento de entrar e sair do mercado.

A variável produção também gera impactos significativos no retorno esperado do projeto (Li et al., 2019; Sahoo et al., 2019; Perdomo et al., 2021; da Silva Lopes et al., 2022) e trata-se de uma variável que já se encontra sobre um maior domínio de controle do investidor, salve a ocorrência de eventos climáticos indesejáveis, desmatamento, queimadas etc. No entanto, o desafio é aumentar a produção sem que haja um aumento significativo nos custos do processo. Para tanto, a escolha de técnicas de manejo da terra e melhoramento genético de mudas, por exemplo, podem representar a longo prazo medidas para o aumento da produção (Li et al., 2019; Sahoo et al., 2019; Perdomo et al., 2021). Ademais, destaca-se o valor do *payback* encontrado entre 7 e 8 anos aproximadamente, tempo compatível ao prazo da primeira colheita realizada no ciclo de 14 anos. Portanto, trabalhar a redução de gastos referentes ao investimento inicial do processo é uma alternativa justificável para os investidores, haja vista que os retornos de caixa ocorrem apenas no período pós-colheita da madeira.

Para o cenário ótimo de Reforma-Condução, os principais custos foram relacionados a adubação e ao combate de formiga manual/mecanizado, ou seja, atividades que compõe o manejo florestal conforme apontado por Sahoo et al. (2019) e da Silva Lopes et al. (2022). Assim, a ideia de utilização de uma adubação orgânica ao invés de uma adubação química surgiu como uma alternativa de minimização de custos. Entretanto, trata-se de uma alternativa que impacta no volume de produção da madeira e que ainda é pouco difundido no campo de produção deste setor.

Desta forma, ressalta-se uma lacuna para a evolução de projetos de implementação desta cultura de produção orgânica no setor como alternativa economicamente sustentável. Além disso,

observa-se a grande dependência do combate a formiga nos estágios de produção de madeira, principalmente no início do ciclo, incorrendo em grandes perdas de produção caso não seja administrado corretamente. O combate a formiga mecanizado apresentou menores custos em razão da sua menor utilização ao longo de todo o ciclo de produção e por representar cortes de custos com mão de obra por exemplo. Já o combate manual, embora gere maiores custos, é mais efetivo repercutindo em maiores volumes de produção ao final do ciclo.

Outro aspecto relevante trata-se da escolha da metodologia de custeio do ciclo de vida em que Degieter et al. (2022), Fauzi et al. (2021), da Silva Lopes et al. (2022), Li et al. (2019), Mirai et al. (2021), He et al. (2020) e Faraca et al. (2019) também abordam em suas obras. Nesta oportunidade, os autores convergem suas perspectivas ao expor a falta de uma padronização para o cálculo do custo do ciclo de vida, e citam algumas alternativas como a análise de ecoeficiência, análise de viabilidade econômica (AVE) e análise de decisão multicritério (Fauzi et al., 2021; Degieter et al., 2022; da Silva Lopes et al., 2022, Zhao; Li, 2022) para a integração de resultados. Neste estudo optou-se pelo cálculo do custo de ciclo de vida da madeira de eucalipto pautado nos fundamentos da AVE, em que as decisões de investimento recaem em um primeiro instante em métodos robustos como o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) por exemplo.

Morales et al. (2015) trataram da avaliação de impactos ambientais associados a plantações de madeira de eucalipto para a produção de bioenergia através da ACV. Para tanto foi considerado as etapas de implantação, colheita, transporte e infraestrutura logística ao longo de 12 anos com períodos de rotação de 4 anos. Os autores identificaram o estágio da colheita como o maior contribuinte para a maioria das categorias de impacto, uma vez que correspondeu a fase com o maior número de emissões de gases de efeito estufa. Nesta ocasião este estudo convergiu com os autores ao destacar o processo de adubação, seja ele como um dos principais processos responsáveis pelo impacto ambiental na produção de madeira de eucalipto (Morales et al. 2015), ou como um dos maiores custos observados nos estágios de produção da madeira.

Ainda de acordo com da Silva Lopes et al. (2022), a integração da pecuária de corte como uma alternativa economicamente sustentável para modelos silviculturais promove uma diluição dos custos ao longo do período de duração do ciclo de produção da madeira, uma vez que a pecuária gera retornos de caixa em um curto intervalo de tempo, o que auxilia na redução do valor de payback do projeto. Para a realidade abordada em nosso estudo também pode-se ressaltar a pecuária como uma alternativa economicamente sustentável, haja vista que a redução do valor de payback incentivaria a adesão de novos investidores no setor de silvicultura.

Por fim, vale destacar o poder de análise comparativa que a metodologia de ACV confere aos estudos, facilitando a tomada de decisão no âmbito da alternativa mais sustentável ambientalmente, economicamente e/ou socialmente (Bajwa et al., 2019; Di Maria et al., 2020; Santolini et al., 2022). Tal fato pode ser ilustrado nas análises realizadas por Peña et al. (2022) e por Sharma e Chandel (2021) em que foram identificados mais de um cenário para as análises do ciclo de produção do tomate e de gerenciamento de resíduos sólidos respectivamente, sob a abordagem econômica do ciclo de vida. No presente estudo, também foram estipulados cenários para a realização da análise comparativa, o que favoreceu para o refinamento do objeto de estudo com a definição de um cenário ótimo, e posterior aplicação de novas técnicas de gestão de riscos. Além disso, a triangulação das técnicas para o cálculo do custo do ciclo de vida de produção de madeira de eucalipto conferiu rigor a análise e maior poder de refinamento ao longo das etapas de estudo.

5. CONCLUSÃO

A consideração da Análise de Viabilidade Econômica (AVE) aliada a técnicas de gestão de riscos contribui de forma efetiva para a tomada de decisões de investidores em um projeto. Neste sentido, este estudo alcançou seu objetivo ao realizar uma Análise de Custo do Ciclo de Vida em uma

empresa brasileira do setor de silvicultura produtora de madeira de eucalipto. Para tanto, os cálculos do custo do ciclo de vida procederam-se em três etapas, a saber, coleta de dados, AVE e Simulação de Monte Carlo.

As contribuições teóricas do estudo se referem a incorporação de uma análise no plano probabilístico à análise determinística. Isso confere maior flexibilidade ao modelo, garantindo a antecipação a possíveis eventualidades que impactam no desempenho do projeto. Dessa maneira, este estudo promove uma abertura de discussões no âmbito da silvicultura para a avaliação de alternativas de plantio de eucalipto, sendo um importante exemplo empírico para o desenvolvimento destas técnicas de viabilidade e gestão de riscos. As contribuições práticas do estudo contemplaram o maior poder de decisão do investidor ao fundamentar-se na metodologia empregada neste estudo e a consideração de novas alternativas de redução de custos no ciclo de produção de eucalipto.

As limitações deste estudo corresponderam a algumas escolhas dos autores com a consideração de uma taxa de desconto elevada (TMA=23,25% a.a.) devido aos valores recentes obtidos pela Taxa Selic que a compõe e a definição do número de iterações realizadas na simulação de Monte Carlo (5000 iterações ao todo). Além disso, outra limitação correspondeu a ocorrência de poucos estudos na literatura direcionados a produção de madeira de eucalipto e que utilizassem as metodologias propostas neste estudo. O estudo também se ateve a proposição de uma agenda de estudo futuros em que se sugere a consideração de um novo estudo focado na técnica de Opções Reais com a abertura de novos cenários de análise de caráter complementar. Ademais sugere-se a replicação deste estudo em outros setores da economia de forma comparativa, a fim de orientar possíveis investidores do setor agrícola sobre as culturas mais rentáveis em um horizonte de tempo determinado. Estudos sobre a análise social e ambiental do ciclo de vida de produção da madeira de eucalipto também são alternativas bem-vindas para esta agenda.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal de Lavras – UFLA e Universidade de Brasília - UnB pelo apoio na construção desta pesquisa. Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2009a). NBR ISO 14040: *Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2009b). NBR ISO 14044: *Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Orientações*. Rio de Janeiro.

Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., & Bajwa, S. G. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. *Industrial Crops and Products*, 139, 111526.

Balcioglu, G., Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2023). Energy from forest residues in Turkey: An environmental and economic life cycle assessment of different technologies. *Science of The Total Environment*, 874, 162316.

Barrantes, L. S., Matsuura, M. I. S. F., Moreira, J. M. M. A. P., Ugaya, C. M. L. (2016). Avaliação do Ciclo de Vida da madeira de eucalipto para produção de energia no Brasil, *V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida*, Fortaleza.

- Carlqvist, K., Arshadi, M., Mossing, T., Östman, U. B., Brännström, H., Halmemies, E., ... & Börjesson, P. (2020). Life-cycle assessment of the production of cationized tannins from Norway spruce bark as flocculants in wastewater treatment. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(6), 1270-1285.
- da Silva Lopes, J., Kiperstok, A., de Figueirêdo, M. C. B., de Almeida Neto, J. A., & Rodrigues, L. B. (2022). Assessing the economic and environmental performance of cleaner production practices in eucalyptus planted forests using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134757.
- Degijter, M., Gellynck, X., Goyal, S., Ott, D., & De Steur, H. (2022). Life cycle cost analysis of agri-food products: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 158012.
- Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2020). Use of LCA and LCC to help decision-making between downcycling versus recycling of construction and demolition waste. In *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling* (pp. 537-558). Woodhead Publishing.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA. (2016). *TT Florestal: Transferência de Tecnologia Florestal*. Perguntas e respostas. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>> Acesso em: 05 ago.
- Faraca, G., Martinez-Sanchez, V., & Astrup, T. F. (2019). Environmental life cycle cost assessment: Recycling of hard plastic waste collected at Danish recycling centres. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 299-309.
- Farjana, S. H., Tokede, O., Tao, Z., & Ashraf, M. (2023). Life cycle assessment of end-of-life engineered wood. *Science of The Total Environment*, 887, 164018.
- Fauzi, R. T., Lavoie, P., Tanguy, A., & Amor, B. (2021). Life cycle assessment and life cycle costing of multistorey building: Attributional and consequential perspectives. *Building and Environment*, 197, 107836.
- He, P., Feng, H., Hu, G., Hewage, K., Achari, G., Wang, C., & Sadiq, R. (2020). Life cycle cost analysis for recycling high-tech minerals from waste mobile phones in China. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119498.
- IBGE. *Inflação*. (2023). Disponível em: <https://ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110038.
- Layton, R. J., Horta Arduin, R., Yazdeen, H., Pommier, R., & Sonnemann, G. (2021). Material Flow Analysis to Evaluate Supply Chain Evolution and Management: An Example Focused on Maritime Pine in the Landes de Gascogne Forest, France. *Sustainability*, 13(8), 4378.
- Li, J., Xiao, F., Zhang, L., & Amirkhanian, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1182-1206.
- Miraj, P., Berawi, M. A., & Utami, S. R. (2021). Economic feasibility of green office building: combining life cycle cost analysis and cost-benefit evaluation. *Building Research & Information*, 49(6), 624-638.
- Monteiro, L. S., Costa, K. A., Christo, E. D. S., & Freitas, W. K. (2021). Economic feasibility analysis of small hydro power projects. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 1653-1664.

- Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., González-García, S., (2015). Avaliação do ciclo de vida do berço ao portão de plantações de rotação curta de *Eucalyptus globulus* no Chile. *J. Limpo. Prod.* 99, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>.
- Olba-Zięty, E., Stolarski, M. J., Krzyżaniak, M., Rój, E., Tyśkiewicz, K., & Łuczyński, M. K. (2022). Supercritical production of extract from poplar containing bioactive substances—An economic analysis. *Industrial Crops and Products*, 184, 115094.
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), (2022). Global Forest Avaliação de Recursos 2022 – Relatório Principal. Brasil. Disponível em: http://www.fao.org/3/CC2211EN/online/CC2211EN.html#chapter-2_4. (Acessado em junho de 2023).
- Peña, A., Rovira-Val, M. R., & Mendoza, J. M. F. (2022). Life cycle cost analysis of tomato production in innovative urban agriculture systems. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133037.
- Perdomo E, E. A., Schwarzbauer, P., Fürtner, D., & Hesser, F. (2021). Life Cycle Assessment of Agricultural Wood Production—Methodological Options: a Literature Review. *BioEnergy Research*, 14, 492-509.
- Pešta, J., Pavlů, T., Fořtová, K., & Kočí, V. (2020). Sustainable masonry made from recycled aggregates: LCA case study. *Sustainability*, 12(4), 1581.
- Punhagui, KRG, John, VM, (2022). Emissões de dióxido de carbono, energia incorporada, eficiência do uso de materiais da madeira produzida a partir de florestas plantadas no Brasil. *J. Construir. Eng.* 52, 104349 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104349>.
- Rai, R., Ranjan, R., & Dhar, P. (2022). Life cycle assessment of transparent wood production using emerging technologies and strategic scale-up framework. *Science of The Total Environment*, 157301.
- Rios, F. C., Grau, D., & Chong, W. K. (2019). Reusing exterior wall framing systems: A cradle-to-cradle comparative life cycle assessment. *Waste management*, 94, 120-135.
- Sahoo, K., Bergman, R., Alanya-Rosenbaum, S., Gu, H., & Liang, S. (2019). Life cycle assessment of forest-based products: A review. *Sustainability*, 11(17), 4722.
- Santolini, E., Barbaresi, A., Bovo, M., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2022). Life cycle assessment of the supply chain processes for the valorisation of corn cob. *Transportation Research Procedia*, 67, 93-99.
- Saosee, P., Sajjakulnukit, B., & Gheewala, S. H. (2020). Life cycle assessment of wood pellet production in Thailand. *Sustainability*, 12(17), 6996.
- Sharma, B. K., & Chandel, M. K. (2021). Life cycle cost analysis of municipal solid waste management scenarios for Mumbai, India. *Waste Management*, 124, 293-302.
- Silva, DAL, (2012). Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil [Avaliação do ciclo de vida da produção de painéis de madeira MDP no Brasil]. *Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais)*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 207.
- Zhao, J., & Li, S. (2022). Life cycle cost assessment and multi-criteria decision analysis of environment-friendly building insulation materials-A review. *Energy and Buildings*, 254, 111582.