

HYAN ZANETTI DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM WEBSITE DE SIMULAÇÃO PARA AUXÍLIO EM
TOMADAS DE DECISÃO NO PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL**

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

Orientador: Luciano José Minette

Coorientadores: Arthur Araújo Silva e Bruno Leão Said Schettini

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2024

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237d
2024

Santos, Hyan Zanetti dos, 1994-

Desenvolvimento de um website de simulação para auxílio em tomadas de decisão no planejamento da colheita florestal / Hyan Zanetti dos Santos. – Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (53 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Luciano José Minette.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.693>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Madeira - Exploração - Métodos de simulação.
2. Florestas - Manejo. I. Minette, Luciano José, 1960-.
- II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.
- III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.9311

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552


HYAN ZANETTI DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM WEBSITE DE SIMULAÇÃO PARA AUXÍLIO EM
TOMADA DE DECISÕES NO PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL**


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

APROVADA: 5 de julho de 2024

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **HYAN ZANETTI DOS SANTOS**
Data: 22/09/2024 23:09:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Hyan Zanetti dos Santos
Autor

Documento assinado digitalmente
 **LUCIANO JOSE MINETTE**
Data: 24/09/2024 15:06:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luciano José Minette
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde, determinação e disciplina para alcançar os objetivos e vencer os desafios.

Aos meus pais, por terem proporcionado o apoio necessário, amor e carinho durante essa fase.

A todos os amigos que fizeram parte dessa caminhada, que com parceria me trouxeram mais felicidade, tranquilidade e confiança e para seguir em frente.

Ao Prof. Dr. Luciano José Minette, pela orientação, pelos ensinamentos e por acreditar no meu desenvolvimento profissional.

Aos pesquisadores Prof. Dr. Arthur Araújo Silva e Prof. Dr. Bruno Leão Said Schettini, pela parceria, coorientação e ensinamentos.

A todos os docentes do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, por atuarem diretamente na construção da minha formação profissional, através da capacitação técnica e científica.

A todos os servidores da Universidade Federal de Viçosa, por agirem diariamente em prol do desenvolvimento da sociedade e contribuir para a realização do desenvolvimento científico.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas das empresas em que trabalhei neste meio tempo, pela contribuição para o meu crescimento profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Todo pensamento com emoção, unido a fé, tende a materializar-se.

(Napoleon Hill)

RESUMO

Santos, Hyan Zanetti, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2024. **Desenvolvimento de um website de simulação para auxílio em tomada de decisões no planejamento da colheita florestal.** Orientador: Luciano José Minette. Coorientadores: Arthur Araújo Silva e Bruno Leão Said Schettini.

As operações de colheita florestal de eucalipto envolvem diversas variáveis que estão diretamente ligadas a rentabilidade do negócio florestal, uma vez que representam grande participação nos custos totais. Devido à importância e abrangência do setor florestal, torna-se evidente a necessidade da elaboração de novas ferramentas para dar suporte às tomadas de decisão dos gestores, visando facilitar a visualização de diferentes cenários com eficácia e assertividade. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um website de simulação de cenários e realizar testes e validações das simulações. Os dados utilizados para modelagem do algoritmo são provenientes de uma empresa florestal localizada em Minas Gerais, gerados através de um modelo logarítmico, que leva em consideração os dados provenientes dos últimos dois anos de colheita. Os parâmetros desse estudo foram a produtividade da floresta, inclinação do terreno e manejo, além da visualização do controle de estoque de madeira em campo e quantidade de dias para transição de área. Com isso, foram realizados testes em campo durante o cotidiano das operações e comparação entre os outputs das simulações e os resultados verificados na atividade. Dessa forma, foi desenvolvido um website através do software *Visual Studio Code*, com linguagem de programação *JavaScript*, utilizando-se de fórmulas matemáticas específicas, para simular diferentes cenários de operação, a fim de otimizar a proporção entre as quantidades de máquinas *harvester* e *forwarder* a serem utilizadas; prever os dias despendidos por área de trabalho; visualizar o consumo de combustível em três unidades e dimensionar o quadro de operadores e materiais de corte. Os resultados permitem concluir que é uma ferramenta eficaz no planejamento da colheita, porém requer ajustes para melhor exatidão em diferentes condições edafoclimáticas e administrativas. O modelo de website constitui uma ferramenta de aplicação prática para suporte nas tomadas de decisão na operação de colheita florestal no sistema *cut-to-length*, de modo que possibilita ao usuário obter uma visualização ágil de diversos cenários de operação.

Palavras-chave: Otimização Florestal; Manejo Florestal; Sistema *cut-to-length*.

ABSTRACT

SANTOS, Hyan Zanetti, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September, 2024. **Development of a Simulation Website to Support Decision Making in Timber Harvesting Planning.** Adviser: Luciano José Minette. Coadvisers: Arthur Araújo Silva and Bruno Leão Said Schettini.

Eucalyptus timber harvesting operations are directly related to the profitability of the forestry business, as it represents a significant portion of the total costs. Due to the importance and scope of the forestry sector, the need to develop new tools to support decision-making for managers becomes evident, aiming to facilitate the visualization of different scenarios effectively and assertively. The objective of this work was to develop a scenario simulation website and conduct tests and validations of the simulations. The data used for the algorithm modeling comes from a forestry company located in Minas Gerais, generated through a logarithmic model that considers data from the last two years of timber harvesting. The parameters of this study were forest productivity, terrain slope, and management, in addition to the visualization of wood stock control in the field and the number of days for area transition. Field tests were carried out during the daily operations, comparing the simulation outputs with the verified results in the activity. Then, a website was developed using Visual Studio Code software with JavaScript programming language, utilizing specific mathematical formulas to simulate different operational scenarios, aiming to optimize the proportion between the number of harvester and forwarder machines to be used, predict the days spent per work area, visualize fuel consumption in three units, and dimension the workforce and cutting materials. The results allow us to conclude that it is an effective tool for harvest planning, but it requires adjustments for better accuracy under different edaphoclimatic and administrative conditions. The website model constitutes a practical application tool to support decision-making in cut-to-length forest harvesting operations, enabling users to quickly visualize many different scenarios.

Keywords: Cut-to-length system; Forest Management; Forest Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1 - Produtividades de HV e FW por VMI, manejo e declividade.	28
Tabela 2 – Razão entre a quantidade de <i>harvesters</i> e <i>forwarders</i> (fatores de otimização).....	29
Tabela 3 - Controle de estoque de campo.....	41
Tabela 4 - Desvios padrão das combinações de máquinas	42
Tabela 5 - Comparativo dos desvios padrão	43
Tabela 6 - Registros de simulações de tempo necessário para operação, em dias. .	44
Tabela 7 - Teste <i>t</i> entre dados reais e simulados	45
Tabela 8 – Correlações lineares dos valores simulados em <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> ...	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtividades de HV e FW por VMI, manejo e declividade.	28
Tabela 2 – Razão entre a quantidade de <i>harvesters</i> e <i>forwarders</i> (fatores de otimização).....	29
Tabela 3 - Controle de estoque de campo.....	41
Tabela 4 - Desvios padrão das combinações de máquinas	42
Tabela 5 - Comparativo dos desvios padrão	43
Tabela 6 - Registros de simulações de tempo necessário para operação, em dias. .	44
Tabela 7 - Teste <i>t</i> entre dados reais e simulados	45
Tabela 8 – Correlações lineares dos valores simulados em <i>harvester</i> e <i>forwarder</i> ...	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CTL	<i>Cut-to-length</i>
DM	Disponibilidade Mecânica
EO	Eficiência Operacional
FW	<i>Forwarder</i>
HV	<i>Harvester</i>
IA	Inteligência Artificial
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
VMI	Volume Médio Individual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Operações de colheita florestal e sua importância econômica.....	14
2.2 Sistema cut-to-length.....	15
2.3 Tecnologias aplicadas na gestão de operações de Colheita Florestal.....	16
2.4 Desafios e limitações na aplicação de simulações em Colheita Florestal.....	17
2.5 Tendências futuras e oportunidades de pesquisa.....	18
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19
CAPÍTULO I: DESENVOLVIMENTO DO WEBISTE DE SIMULAÇÃO PARA PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL.....	24
1. INTRODUÇÃO.....	24
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
2.1 Desenvolvimento.....	25
2.2 Inputs operacionais.....	26
2.3 Ajuste de algoritmos e caracterização de dados.....	27
2.4 Outputs operacionais.....	29
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
3.1 Relação <i>harvester</i> e <i>forwarder</i>	29
3.2 Fluxo de processo das simulações.....	30
3.3 Interface da página.....	33
4. CONCLUSÕES.....	33
5. REFERÊNCIAS.....	34
CAPÍTULO II: UTILIZAÇÃO E APLICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES PARA TOMADAS DE DECISÃO NA COLHEITA FLORESTAL.....	35
1. INTRODUÇÃO.....	35
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
2.1 Caracterização do local do estudo.....	36
2.2 Coleta de dados.....	37
2.3 Caracterização dos dados.....	38
2.4 Simulações.....	38
2.5 Análise de dados.....	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40

3.1 Otimização das quantidades de máquinas	40
3.2 Predição de dias por área de trabalho	44
3.3 Análise da conversão de consumo de combustível.....	47
3.4 Dimensionamento de quadro operadores e materiais de corte.....	48
4. CONCLUSÕES	49
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor florestal é responsável por contribuir com uma vasta gama de produtos necessários ao cotidiano da população mundial. Além da celulose e papel, é fundamental também na produção de matéria-prima para laminados e produção sustentável de biomassa florestal para energia, entre outros. É importante ressaltar, que no Brasil já são 10,2 milhões de hectares de florestas plantadas, demonstrando um crescimento de 3% comparado ao ano anterior. Os plantios de eucalipto representam 7,8 milhões de hectares, com produtividade média de 33,7 m³ de madeira por hectare por ano (IBÁ, 2024). Com isso, a competitividade se torna cada vez maior, gerando a necessidade de um planejamento mais assertivo.

Nesse âmbito, a colheita florestal surge como uma das principais operações envolvidas na produção de madeira proveniente de árvores plantadas, a qual pode representar mais da metade do custo total da madeira posta em fábrica (MACHADO *et al.*, 2014). Na colheita de madeira, podem ser utilizados vários sistemas, destacando-se o *cut-to-length*, que se caracteriza pelo processamento e seccionamento da madeira em até 6 metros de comprimento com o *harvester*, com posterior extração das toras feita pelo *forwarder* (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Werneburg (2015), o planejamento da colheita florestal é fundamental na gestão de atividades e otimização de recursos. Para isso, deve-se levar em consideração fatores como sequenciamento de corte, que é influenciado pela variação de densidade básica, a secagem da madeira pós-corte, idade mínima e precipitação local; a produção mensal na idade de corte, utilizada para otimizar o sequenciamento; o microplanejamento, que visa demarcar em campo a logística da operação, considerando declividades e acessos; e os rendimentos operacionais, que estão relacionados ao volume médio individual (VMI), espaçamento, classificação de solo, fatores humanos relacionados aos operadores, manutenção mecânica, gestão da operação, clima e espécie vegetal.

Dentre esses fatores, o VMI e a declividade estão entre os que mais influenciam na produtividade das máquinas de colheita florestal, somado a outros fatores como espécie; diâmetro; altura; qualidade da madeira; densidade de estradas; alinhamento e densidade de estradas (MALINOVSKI *et al.* 2006).

Dessa forma, ao considerar as diversas variáveis que influenciam no planejamento operacional, esse deve ser feito de modo a buscar a garantia do rendimento operacional, proporcionando maior e melhor produção, além de menor custo (MASIOLI *et al.*, 2024). No entanto, devido ao grande número de fatores envolvidos e ao alto custo da operação, é evidente a necessidade de que os gestores das empresas disponham de ferramentas e metodologias adequadas para gerar informações valiosas (CASTELO-BRANCO *et al.*, 2022).

Destaca-se, portanto, que o uso de ferramentas de gestão de operações é de suma importância para administração da atividade de colheita florestal, uma vez que a geração de informações pertinentes à utilização dos recursos permite uma visão mais ampla do comportamento das variáveis envolvidas no processo. De acordo com Vendrametto *et al.* (2016), o uso de simulações pode representar um recurso significativo nesse contexto, considerando que permitem enfrentar adversidades ao criar opções em face de tantos fatores essenciais e determinantes.

Dentre as várias formas de elaboração de ferramentas de gestão para a realização de simulações de cenários, uma alternativa é a programação de *websites*, que podem ser programados com fórmulas matemáticas que objetivam o cálculo de variáveis a partir de dados reais de operação inseridos pelo usuário. Logo, quando programados visando a realização de simulações, os *websites* podem constituir uma ferramenta ágil para permitir a visualização de diferentes cenários, a fim de auxiliar em tomadas de decisão dos gestores que buscam reduzir os custos e maximizar a produtividade do negócio florestal.

Diante do exposto, o objetivo geral do presente estudo foi desenvolver um *website* para fornecer suporte em tomadas de decisão nas operações de colheita florestal, sistema *cut-to-length*. Os objetivos específicos foram: otimizar a proporção entre as quantidades de *harvesters* e *forwarders* a serem utilizadas no sistema de colheita, considerando parâmetros como produtividade da floresta, inclinação do terreno e manejo florestal; predizer os dias necessários para concluir a produção em cada área de trabalho; visualizar a conversão de unidades do consumo de combustível; dimensionar o número de operadores de máquinas florestais; estimar a quantidade de material de corte necessário; realizar testes e validações das simulações desenvolvidas em campo, comparando os resultados com as atividades cotidianas de colheita florestal e avaliar a eficácia do *website* como ferramenta de

apoio à tomada de decisão, identificando áreas que necessitam de ajustes para melhorar sua exatidão em diferentes condições.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Operações de colheita florestal e sua importância econômica

Entre os sistemas de colheita florestal mecanizada utilizados globalmente, os mais representativos são o *cut-to-length* e o *full tree*. O *cut-to-length*, que foi utilizado como base de estudos neste trabalho, também chamado de sistema de toras curtas, utiliza o *harvester* para a operação de corte e o *forwarder* para a operação de extração. Por outro lado, o *full tree*, ou sistema de árvores inteiras, emprega um *feller buncher* para o corte e o *skidder* para a extração de árvores inteiras. No entanto, esse processo demanda investimentos iniciais bastante elevados e dependendo da maneira de como o sistema é gerido, pode resultar em uma significativa redução no valor do produto. Dessa forma, a automatização das operações de colheita começou a ser mais analisada por possuir capacidade de elevar a eficiência, diminuir custos e aprimorar as condições laborais (UDALI *et al.*, 2023).

A partir dos anos 1990, com a expansão da economia do Brasil e, por conseguinte, a elevação da procura por produtos derivados de florestas, o setor florestal brasileiro passou por inúmeras transformações, como o desenvolvimento da tecnologia, aumento de investimentos no setor e especialização da mão de obra. Essas alterações culminaram na adoção e atualização de máquinas e equipamentos, com a finalidade de incrementar a produtividade (MINETTE *et al.*, 2008).

O setor brasileiro de produção florestal vem crescendo de forma significativa nos últimos anos, devido à alta demanda nacional e internacional. Para a obtenção de madeira, tem-se a colheita florestal como parte fundamental nesse processo, impactando consideravelmente nos custos operacionais (FREITAS, 2024) e tendo grande participação no valor financeiro final do produto (MACHADO, 2014).

A indústria florestal se destaca por sua resiliência e habilidade de adaptação. Sua relevância estratégica para a economia nacional é evidenciada pela sólida carteira de investimentos, que atualmente totaliza R\$ 105 bilhões em projetos de expansão planejados para os próximos cinco anos, consolidando o crescimento e aumentando a competitividade no cenário global. Comparando este setor com outras atividades econômicas no país, o segmento florestal voltado para fins industriais ultrapassou o setor de máquinas e equipamentos (1,1%), alcançando o 5º lugar no ranking de contribuição ao PIB nacional, ficando atrás apenas da construção civil (5%), eletricidade, gás, água, esgoto e serviços de limpeza urbana (2,6%), alimentos e bebidas (2%) e petróleo e gás (1,9%) (IBÁ, 2024).

Os retornos econômicos das atividades florestais podem ser impulsionados por um planejamento florestal aprimorado, que busque o aumento de produtividade e redução de custos, de modo a potencializar a produção e assegurar a perenidade do empreendimento. Diversos modelos matemáticos indicam que há espaços para a redução dos custos de colheita. (WERNEBURG, 2015; JAROCHINSKI E SILVA, 2019; AMÉRICO, 2024).

2.2 Sistema cut-to-length

No Brasil, um dos sistemas mais utilizados para colheita florestal é o “*cut-to-length*”, ou CTL, em que realização das atividades de corte, desgalhamento e traçamento ocorrem no local onde a árvore foi derrubada, sendo a árvore seccionada em toras de até 6 metros (MALINOVSKI *et al.* 2008). O *harvester* é um trator que derruba, desgalha, traça e empilha, composto por uma máquina base com rodados de pneus ou esteiras, grua e cabeçote, enquanto o *forwarder* é um trator florestal equipado com grua hidráulica e garra, que realiza a extração do interior do talhão para a margem da estrada. As principais vantagens desse sistema são as curtas distâncias de deslocamento e os baixos danos ao meio ambiente, uma vez que compacta menos o solo, visto que os resíduos (galhos e folhas), ficam espalhados pelo talhão, porém como desvantagem, não são utilizados para energia, polpa e papel. (MALINOVSKI e MALINOVSKI, 1998; DOS SANTOS *et al.*, 2016; MASIOLI *et al.*, 2023). Além disso,

os sistemas de colheita mecanizada de toras curtas se tornaram abrangentemente utilizados em muitos países, como Suécia, Irlanda e Finlândia, em comparação com o método semimecanizado (KARJALAINEN *et al.*, 2001).

Em relação ao sistema CTL, podem ser citadas algumas vantagens como redução de impactos ambientais, através da menor compactação do solo e não exportação de nutrientes, além de benefícios econômicos por exigir menor densidade ótima e aceitável de estradas (OLIVEIRA, 2013; SOUZA *et al.*, 2018)

2.3 Tecnologias aplicadas na gestão de operações de Colheita Florestal

Randhawa e Olsen (1990), empregaram simulações para prever, controlar e verificar operações de colheita, bem como monitorar o fluxo de produção desde a extração até a fábrica. Por sua vez, Randhawa e Scott (1996) conduziram um estudo sobre a aplicação de um modelo de simulação na colheita florestal comercial, destacando a importância dessa prática devido à sua relevância para o setor florestal.

Linehan e Corcoran (1994), desenvolveram o “X-Harvester”, sistema de apoio à decisão relativo à colheita de florestas plantadas, visando conduzir o usuário através de uma série de questões para chegar na determinação da viabilidade do negócio, através de IA. Malinovski (1999), desenvolveu um simulador para extração florestal que analisou mais de 70 fatores influenciadores da eficiência e dos custos da operação, revelando-se uma ferramenta útil para o planejamento flexível e rápido das operações de produção de pinus e eucalipto. Junior *et al.* (2016) ressaltam a importância das simulações no contexto florestal, destacando sua capacidade de resolver desafios e propor alternativas diante de diversos fatores determinantes.

Já em 2021, foi criado o software Harvest Scheduling System, destinado a replicar situações de colheita florestal com o intuito de atender às exigências do planejamento prático de colheita por meio da avaliação de vários parâmetros (LOPES, 2021). Sampaio (2023), utilizou em seu trabalho o software *simul8* e documentou o desenvolvimento ao longo dos anos de diversas ferramentas de simulação para os setores de planejamento e operações florestais. Entre elas, destaca-se o software

Arena, utilizado por Heinrich (2010) para simular o planejamento de matéria-prima e organizar escalas e custos; o emprego das simulações para estudar frotas por Silva (2015), e a utilização por Dimopoulou e Giannikos (2004) para analisar situações e dimensionar equipes no controle de incêndios.

O estudo e aplicação de modelagens matemáticas é amplamente utilizado no âmbito de planejamento em operações de colheita florestal, visando calcular fatores como capacidade operacional; volume mensal médio de colheita e transporte; minimização de custos e de deslocamento. (BANHARA, 2009; DOS SANTOS, 2018; SANTOS, 2019; MATOS, 2020; AMÉRICO, 2024)

2.4 Desafios e limitações na aplicação de simulações em Colheita Florestal

Na simulação de diferentes alternativas para otimização das técnicas de colheita, pode haver limitações administrativas, restrições de meio ambiente e implicações socioeconômicas (KANTOLA e HARSTELA, 1994). Segundo Malinovski (1999), diversas variáveis apresentam desafios para determinação direta, exigindo uma cuidadosa estimativa de sua influência sobre as operações. Estas incluem o potencial de erodibilidade do solo, a estabilidade das encostas, a qualidade, habilidade e disponibilidade da mão de obra, as demandas impostas pelo manejo florestal, os riscos de compactação do solo e a probabilidade de flutuações climáticas abruptas. Esses fatores impõem restrições variáveis à implementação dos sistemas de colheita de madeira, dependendo de suas correlações positivas ou negativas com outras variáveis.

Sampaio (2023), relata que as tecnologias essenciais ao uso da telemetria são utilizadas majoritariamente nas áreas urbanizadas e fabris e a aplicabilidade no campo ainda é considerada um obstáculo, devido aos desafios de conectividade, entre outros fatores. Um dos principais desafios está relacionado à complexidade e variabilidade dos ecossistemas florestais. Modelar com precisão os processos biológicos e ecológicos que ocorrem nas florestas exige dados detalhados e específicos, que nem sempre estão disponíveis ou são de fácil acesso. Além disso, a variabilidade espacial

e temporal dos dados florestais pode complicar ainda mais a criação de modelos precisos e generalizáveis (MELLO *et al.*, 2016).

2.5 Tendências futuras e oportunidades de pesquisa

O mundo está passando por rápidas transformações impulsionadas pelo desenvolvimento de tecnologias computacionais e plataformas digitais. Nas últimas duas décadas, observou-se um significativo avanço nas tecnologias de *Data Science*, *Analytics*, *Machine Learning* e Inteligência Artificial (IA), que proporcionam novas oportunidades para a geração e disseminação de informações e inteligência para gestores de projetos e tomadores de decisão. A adoção de técnicas apropriadas de *Data Science* e *Machine Learning* pode aprimorar substancialmente as práticas de gestão empresarial, contribuindo para a administração de equipes, a alocação de recursos, o monitoramento de indicadores e resultados, a tomada de decisões e, conseqüentemente, o gerenciamento de projetos (DZIEWIECKI, 2023).

Estudos recentes indicam que a aplicação de IA na análise de dados florestais tem o potencial de otimizar operações de colheita florestal, reduzir custos e minimizar impactos ambientais. Por exemplo, algoritmos de aprendizado de máquina podem ser treinados para identificar padrões em grandes conjuntos de dados, como imagens de satélite e informações de inventário florestal, auxiliando em tomadas de decisão relacionadas à seleção de áreas de corte, planejamento de rotas de extração e estimativa de volume de madeira a ser colhida (RAIHAN, 2019).

Além disso, a integração de tecnologias de sensoriamento remoto, como imagens de alta resolução e dados provenientes de LIDAR (Light Detection and Ranging), pode fornecer informações detalhadas sobre a estrutura e a composição das florestas. Esses dados podem ser combinados com modelos de IA para realizar análises mais precisas e em tempo real, permitindo uma gestão mais eficaz e adaptativa das operações de colheita (CAFFARATTI *et al.*, 2020).

No entanto, é importante destacar que a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios significativos, como a necessidade de infraestrutura computacional robusta, expertise técnica e investimentos financeiros. Além disso, questões éticas e regulatórias relacionadas à privacidade dos dados e ao uso responsável de técnicas de Inteligência Artificial também precisam ser consideradas (SILVA *et al.*, 2021).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMÉRICO, Aline Souza Andrade Bueno. **Modelagem matemática para o planejamento florestal de curto prazo de uma empresa do setor florestal**. Trabalho de conclusão de Curso (Especialização em Ciência dos Dados) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2024.

BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático**. 166 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CAFFARATTI *et al.* Improving Forest detection with machine learning in remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2, p. 220, 2020.

CASTELO-BRANCO, I.; MOREIRA, F.; CORREIA, A. M. Measuring the fourth industrial revolution through the industry 4.0 lens: The relevance of resources, capabilities and the value chain. **Computers in Industry**, v. 138, p. 103626, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103639>. Acesso em 23 ago. 2024.

DIMOPOULOU, M.; GIANNIKOS, I. **Towards an integrated framework for forest fire control**. European journal of operational research, v. 152, n. 2, p. 476-486, 2004.

DZIEWIECKI, L. **Artificial Intelligence and machine learning in project management: a new era of transformation: transforming project execution: harnessing AI and ML do revolutionize the way we manage projects**. Independently Published, 2023.

DOS SANTOS, *et al.* (2016). Avaliação de custos da operação de extração da madeira com forwarder. **CERNE**, 22(1), 27–34.

DOS SANTOS, Paulo Amaro Velloso Henrique. **Uma metodologia de otimização integrada para a colheita e o transporte de produtos florestais**. 106 p. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1884/65423>> Acesso em: 01 jun. 2024.

FREITAS, Larissa Lara Moreira da Silva. **Análises de rendimento em operações de arraste simples e arraste duplo na colheita florestal**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Uberlândia, 2024.

HEINRICH, Daniele. **Simulação da produção de madeira serrada**. Orientador: Dr. Antônio Carlos Gastaud Maçada. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. IBÁ 2024. Brasília, DF, 2024. **Relatório anual 2024**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf>>.

JAROCHINSKI E SILVA, Carolina Souza. **Alocação de fomentos florestais sob condições de incerteza**. 89 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/37403>>. Acesso em: 10 ago. 2024

JUNIOR, S. C.; CARDOSO, L. E. Z.; VENDRAMETTO, L. L. **Análise de um sistema de carregamento de madeiras com auxílio da simulação computacional: um estudo de caso**. *Tekhne e Logos*, v. 7, n. 1, p. 47-56, 2016.

KANTOLA, M.; HARSTELA, P. **Manual de tecnologia apropriada às operações florestais em países em desenvolvimento: Parte II**. Programa de treinamento florestal publicação n. 19. Direção Nacional de Educação Vocacional do Governo da Finlândia. Helsinki, 1988. Tradução: ROSOT, M. A. D. Curitiba: UFPR, 1994

KARJALAINEN *et al.* **Energy, carbon and other material flows in the life cycle assessment of forestry and forest products**. Achievements of the Working Group 1 of the COST Action e9. Finlândia: European Forest Institute, 2001. 68 p.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal. 3 ed.**, Viçosa: Editora UFV. 468. p. 2014

Malinovski, R. A. *et al.* Análise das variáveis de influência na produtividade das máquinas de colheita de madeira em função das características físicas do terreno, do povoamento e do planejamento operacional florestal. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 36, n. 2, mai./ago. 2006.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. **Evolução dos sistemas de colheita de pinus na região Sul do Brasil**. Curitiba: FUPEF, 1998. 108p

MALINOVSKI *et al.* A. Sistemas. In: MACHADO, C. C.; **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV, Imp. Univ., 2 ed., 2008.

MALINOVSKI, R. A.; **Programa computacional de simulação para análise de sistemas de colheita de madeira**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, p. 140. 1999.

MASIOLI, W *et al.* Variáveis de influência da produtividade na extração de madeira em um sistema de toras curtas **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, São José dos Pinhais, v.17, n.2, p. 01-14, 2024.

MASIOLI, W. *et al.* Effect of wood stacking on productivity and cost of forest extraction and loading. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 53, n.3, p. 305 -315, 2023

MATOS, L. M. A. **Aplicações da pesquisa operacional no manejo e planejamento florestal**. 73 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020. Mestrado em Engenharia Florestal.

Mello, J. M., Péllico Netto, S., Machado, S. A., e Pereira, R. S. (2016). **"Modelagem e simulação do crescimento e da produção de florestas plantadas: estado da arte e perspectivas."** *Revista Árvore*, 40(3), 553-570

MINETTE, Luciano J., *et al.* **"Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada em Niquelândia, Goiás."** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12 (2008): 659-665.

MOREIRA, T. B.; **Melhoria contínua na colheita florestal de sistema *full-tree***. Pós-Graduação em Gestão Florestal, Departamento de Economia Rural e Extensão, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, p.23. 2012.

Linehan, P.E., Corcoran, T.J., 1994. **An expert-system for timber harvesting decision-making on industrial forest lands**. For. Prod. J. 44, 65-70.

LOPES, Pablo Falco. **Autômato celular no planejamento de colheita florestal**. 2021. 83 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

RAIHAN, Asif. Artificial intelligence and machine learning applications in forest management and biodiversity conservation. **Natural Resources Conservation and Research**, v. 6, n. 2, p. 1-10, 2023. doi: 10.24294/nrcr.v6i2.3825.

Randhawa, S.U. and E.D. Olsen, "**Timber harvesting analysis and design using simulation**" The. Pakistan Journal of Forestry, 40, 3, 210-214, 1990.

Randhawa, S.U. and T.M. Scott, "**Model generation for simulation analysis: An application to timber harvesting**" Computers & Industrial Engineering, 30, 1, 51-60, 1996.

SAMPAIO, Iara Silva. **Modelagem de um gêmeo digital para extração florestal com *forwarder***. 93p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

SANTOS, Ana Carolina de Albuquerque. **Modelagem matemática para planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte**. 77 p. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

SILVA, Arthur Araújo.; **Tecnologias digitais aplicadas na gestão do corte florestal com harvester**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, p. 81. 2021.

SILVA, Natasha Roberta Galvão da. **Análise e dimensionamento de frota de caminhões em circuito fechado para fornecimento de madeira**. 2015. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015

Udali, A. *et al.*, 2023. **Logging residue assessment in salvage logging areas.** South-East Eur. 14 (1), 69–81. [https://doi.org/ 10.15177/seefor.23-10](https://doi.org/10.15177/seefor.23-10).

WERNEBURG, Mauro Antônio Pereira. **Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil.** 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) — Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2015. Disponível em: : <<http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/1045>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

CAPÍTULO I: DESENVOLVIMENTO DO WEBISTE DE SIMULAÇÃO PARA PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias de desenvolvimento de websites têm evoluído rapidamente, permitindo a criação de sites mais interativos, eficientes e seguros, proporcionando as ferramentas necessárias para desenvolver interfaces interativas e funcionalidades complexas. Linguagens de programação como HTML, CSS e JavaScript formam a base do desenvolvimento web, enquanto frameworks e bibliotecas como React, Angular e Vue.js facilitam o desenvolvimento de aplicações web modernas e dinâmicas (FLANAGAN, 2020).

O *Visual Studio Code* (VS Code) é outro componente crucial no desenvolvimento de websites de simulação de cenários, visto que é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) e oferece uma vasta gama de extensões que suportam múltiplas linguagens de programação e ferramentas de desenvolvimento, incluindo suporte avançado para *JavaScript*, *TypeScript*, e *frameworks* populares. A integração com sistemas de controle de versão como Git, bem como ferramentas de depuração e testes, facilita o desenvolvimento colaborativo e a manutenção de código de alta qualidade (CHEN, 2019).

A combinação de JavaScript e VS Code cria um ambiente de desenvolvimento poderoso e flexível para a criação de websites de simulação de cenários. JavaScript, com suas capacidades de execução no cliente, permite a criação de interfaces de usuário interativas e simulações em tempo real, enquanto VS Code fornece um ambiente de desenvolvimento integrado que suporta todas as fases do ciclo de vida do desenvolvimento de software. (MIKSOVSKY e NOVAK, 2020).

Dentre os diversos conceitos de simulação já relatados, há o de Pegden (1991), o qual cita que “simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”. Dessa forma,

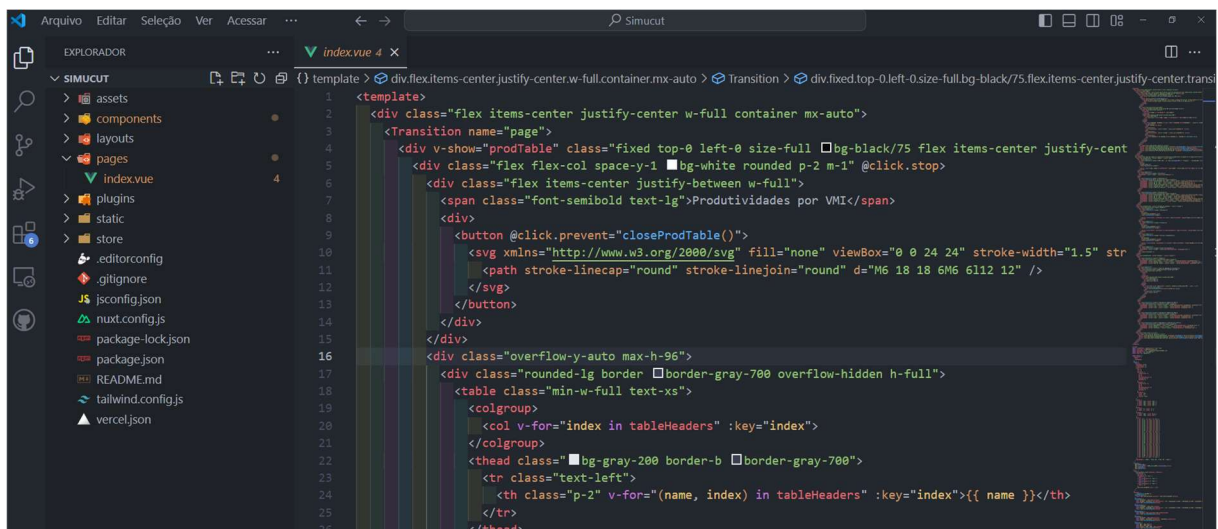
buscou-se a construção de um *website* de simulação que auxilie no planejamento operacional em colheita florestal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Desenvolvimento

O *website*, denominado *SimuCut*, foi desenvolvido utilizando o *software Visual Studio Code* (Figura 1), uma ferramenta amplamente reconhecida e utilizada por desenvolvedores de *software*. A linguagem de programação principal empregada no desenvolvimento foi a *JavaScript*, que oferece flexibilidade e recursos poderosos para a criação de interfaces interativas e dinâmicas. Além disso, foram utilizadas linguagens complementares como *CSS* para estilização e *HTML* para estruturação do conteúdo.

Figura 1 - Interface do software Visual Studio Code



Fonte: O autor.

O desenvolvimento do *SimuCut* envolveu várias etapas, desde a concepção da interface até a implementação dos algoritmos de simulação, que são uma sequência de operações matemáticas específicas para alcançar os objetivos do simulador, como

cálculo de produções e estoques. Inicialmente, foram projetados os elementos visuais e funcionais do *website*, levando em consideração a usabilidade e a experiência do usuário. Em seguida, foram escritos os códigos em *JavaScript* para criar as funcionalidades de simulação, que incluem o processamento dos dados de entrada, a execução dos algoritmos de cálculo e a apresentação dos resultados de forma clara e intuitiva.

Durante o processo de desenvolvimento, foram realizados testes para garantir a robustez e a precisão do *SimuCut*, incluindo testes de unidade para verificar o funcionamento correto de cada componente e testes de integração para avaliar a interação entre os diferentes módulos do sistema. Além disso, foram feitas iterações no design e nas funcionalidades. Após a conclusão do desenvolvimento, o *website SimuCut* foi hospedado e publicado utilizando a plataforma *Hostinger*.

2.2 Inputs operacionais

A estrutura do *SimuCut* foi composta pelos seguintes *inputs*, a serem inseridos pelo usuário (FIGURA 2):

- **VMI (m³):** Volume Médio Individual das árvores.
- **Inclinação do terreno (°):** característica topográfica da área.
- **Árvores por hectare:** quantidade de árvores por hectare, de acordo com o espaçamento do plantio.
- **Consumo de óleo diesel médio real (L/h):** consumo atualmente realizado pelas máquinas, obtido a partir dos apontamentos de abastecimento.
- **Eficiência Operacional (%):** mede o tempo efetivamente utilizado, em horas, para as atividades produtivas em cada período $t \in T$. A Equação 1 mostra o cálculo de EO como a razão entre a produção real e a produção potencial da máquina, expressa como um percentual (LINHARES *et al.*, 2012). É obtido pelas empresas através de apontamentos operacionais.

$$EO = \gamma_t \alpha_t (100\%) \quad \forall t \in T \quad (1)$$

- **Disponibilidade Mecânica (%):** representa o tempo, em horas, em que as máquinas estão operacionais e prontas para o trabalho à cada período de tempo $t \in T$. A Equação 2 mostra como é feito o cálculo de DM, a partir da razão entre o tempo total de operação do equipamento e o tempo total disponível, expressa como um percentual (LINHARES *et al.*, 2012). É obtido pelas empresas através de apontamentos operacionais.

$$DM = \alpha t \beta t (100\%) \quad \forall t \in T \quad (2)$$

- **Escalas e turnos de trabalho:** planejamento das horas e dias em que os funcionários devem trabalhar.
- **Produção desejada (m³):** quantidade de produção, em m³, da área, fazenda ou projeto, para a qual o usuário deseja simular.
- **Quantidade de máquinas disponíveis:** máquinas que a empresa dispõe para serem operadas.
- **Produtividade média das máquinas (m³/h):** Produtividade (Pd), medida em metros cúbicos por hora, quantifica o volume de madeira colhida em relação ao tempo gasto em cada período $t \in T$. Conforme mostrado na Equação (3.3) o valor de Pd é definido como a razão entre a quantidade de madeira colhida e o tempo necessário para realizar essa operação, expressa em metros cúbicos por hora (m³/h), para cada horizonte de tempo $t \in T$ (SILVA, 2017). Assim como EO e DM, também é obtida por apontamentos operacionais.

$$Pd = v t \pi t \quad \forall t \in T \quad (3)$$

2.3 Ajuste de algoritmos e caracterização de dados

Para que as produtividades de *harvester (HV)* e *forwarder (FW)* mantenham-se próximas, fazendo com que a relação esteja otimizada de acordo com o número de máquinas, é necessário realizar o ajuste dos algoritmos. Para isso, foram utilizados

dados de uma curva de produtividades (m³/h) orçadas por VMI, provenientes de uma empresa florestal localizada em Minas Gerais (TABELA 1).

Tabela 1 - Produtividades de HV e FW por VMI, manejo e declividade.

VMI (m ³ /arv)	Harvester			VMI (m ³ /arv)	Forwarder		
	Produtividade (m ³ /h)				Produtividade (m ³ /h)		
	0-28 graus SC	CC	28-36 graus SC		0-28 graus SC	CC	28-36 graus SC
0,10	8,90	11,07	4,90	0,10	30,89	22,77	16,06
0,11	10,21	12,27	5,74	0,11	31,06	22,96	16,25
0,12	11,40	13,36	6,51	0,12	31,23	23,14	16,41
0,13	12,49	14,37	7,22	0,13	31,38	23,31	16,56
0,14	13,50	15,30	7,87	0,14	31,51	23,46	16,71
0,15	14,45	16,17	8,48	0,15	31,64	23,60	16,84
0,16	15,33	16,98	9,06	0,16	31,76	23,74	16,96
0,17	16,16	17,75	9,59	0,17	31,88	23,86	17,08
0,18	16,94	18,46	10,10	0,18	31,98	23,98	17,18
0,19	17,68	19,15	10,58	0,19	32,08	24,10	17,29
0,20	18,38	19,79	11,03	0,20	32,18	24,21	17,39
0,21	19,05	20,40	11,46	0,21	32,27	24,31	17,48
0,22	19,69	20,99	11,87	0,22	32,36	24,41	17,57
0,23	20,30	21,55	12,27	0,23	32,44	24,50	17,65
0,24	20,88	22,09	12,64	0,24	32,52	24,59	17,73
0,25	21,44	22,60	13,00	0,25	32,60	24,68	17,81
0,26	21,97	23,09	13,35	0,26	32,67	24,76	17,89
0,27	22,49	23,57	13,68	0,27	32,74	24,85	17,96
0,28	22,99	24,03	14,01	0,28	32,81	24,92	18,03
0,29	23,47	24,47	14,32	0,29	32,87	25,00	18,09
0,30	23,93	24,89	14,62	0,30	32,94	25,07	18,16
0,31	24,38	25,31	14,91	0,31	33,00	25,15	18,22
0,32	24,81	25,71	15,19	0,32	33,06	25,22	18,28
0,33	25,23	26,09	15,46	0,33	33,12	25,28	18,34
0,34	25,64	26,47	15,72	0,34	33,17	25,35	18,40
0,35	26,04	26,83	15,98	0,35	33,23	25,41	18,45
0,36	26,43	27,19	16,23	0,36	33,28	25,47	18,51
0,37	26,80	27,53	16,47	0,37	33,33	25,53	18,56
0,38	27,17	27,87	16,71	0,38	33,38	25,59	18,61
0,39	27,52	28,20	16,94	0,39	33,43	25,65	18,66
0,40	27,87	28,51	17,16	0,40	33,47	25,71	18,71

Nota: VMI = volume médio individual. SC = sem casa. CC = com casca.

A modelagem dessa curva é realizada através da utilização de um modelo logarítmico, no qual os dados utilizados na construção provêm dos boletins de apropriação apontados nos dois últimos anos de colheita. Esses dados passam por uma verificação de consistência para assegurar sua precisão e confiabilidade. Posteriormente, são aplicados modelos levando em conta a produtividade em relação ao Volume Médio Individual (VMI). As curvas obtidas são ajustadas com base nas médias definidas durante as reuniões de planejamento da equipe designada pela organização.

Neste estudo, foram utilizados como base esses dados de produtividade (m^3/h) de acordo com volume médio individual (VMI), com intuito de estudar a melhor a razão HV / FW para cada faixa de VMI, para que ao realizar a divisão dos valores de produtividades, possa ser alcançada a tabela de fatores numéricos de relação entre as máquinas.

2.4 Outputs operacionais

A partir dos inputs inseridos e o algoritmo ajustado, espera-se que sejam retornados os seguintes *outputs*: razão ótima entre quantidades de HV/FW; possíveis combinações de máquinas; tempo de corte e extração; tempo de estoque de campo (saldo de estoque que retrata a diferença entre produções de corte e extração) e consumo de combustível em L/m^3 e L/ha .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Relação *harvester* e *forwarder*

Os dados de produtividade angariados com base na série temporal da empresa, na Tabela 1, foram base para a construção dos algoritmos. Ao realizar uma operação de divisão entre as produtividades de HV pelas produtividades de FW, por VMI, temos os fatores de otimização demonstrados a seguir (TABELA 2).

Tabela 2 – Razão entre a quantidade de *harvesters* e *forwarders* (fatores de otimização)

VMI (m^3/arv)	Relação HV e FW			
	0-28 graus		28-36 graus	
	SC	CC	SC	CC
0,1	3,5	2,1	3,3	
0,11	3	1,9	2,8	
0,12	2,7	1,7	2,5	

0,13	2,5	1,6	2,3
0,14	2,3	1,5	2,1
0,15	2,2	1,5	2
0,16	2,1	1,4	1,9
0,17	2	1,3	1,8
0,18	1,9	1,3	1,7
0,19	1,8	1,3	1,6
0,2	1,8	1,2	1,6
0,21	1,7	1,2	1,5
0,22	1,6	1,2	1,5
0,23	1,6	1,1	1,4
0,24	1,6	1,1	1,4
0,25	1,5	1,1	1,4
0,26	1,5	1,1	1,3
0,27	1,5	1,1	1,3
0,28	1,4	1	1,3
0,29	1,4	1	1,3
0,3	1,4	1	1,2
0,31	1,4	1	1,2
0,32	1,3	1	1,2
0,33	1,3	1	1,2
0,34	1,3	1	1,2
0,35	1,3	0,9	1,2
0,36	1,3	0,9	1,1
0,37	1,2	0,9	1,1
0,38	1,2	0,9	1,1
0,39	1,2	0,9	1,1
0,4	1,2	0,9	1,1

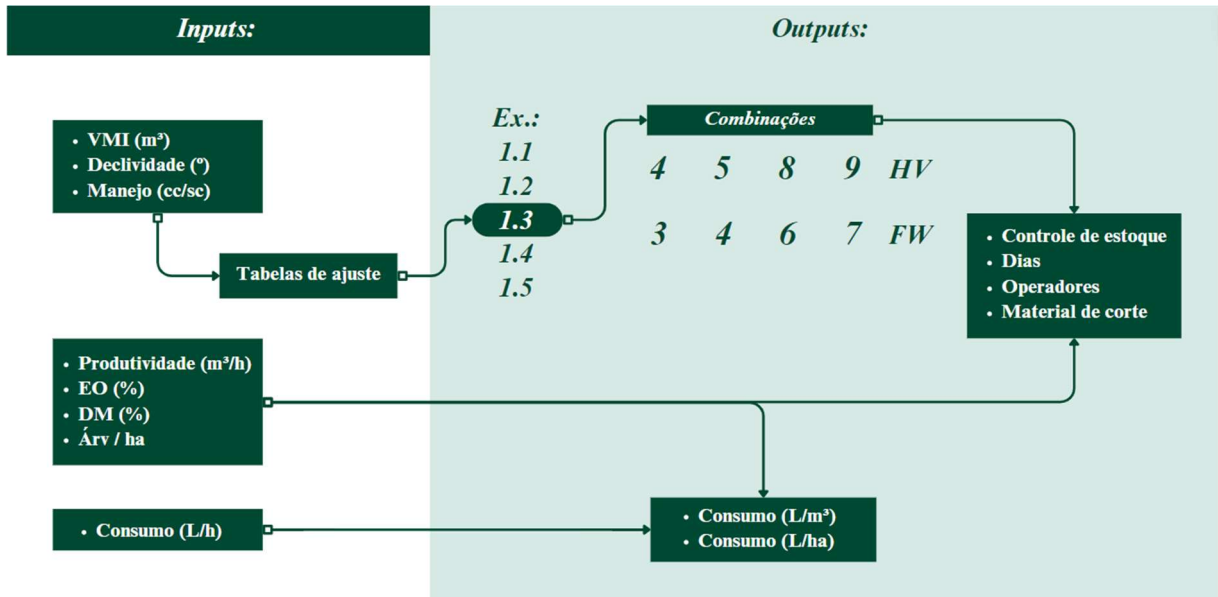
Nota: VMI = volume médio individual. SC = sem casca. CC = com casca. Os fatores de razão foram obtidos através da divisão (produtividade HV / produtividade FW), relativos a cada valor de VMI.

A partir dessa relação, viabilizou-se o ajuste dos algoritmos das simulações, para que quando seja inserido um determinado valor de VMI como *Input*, a simulação retorne a relação de máquinas ideal para a operação. De acordo com Spinelli *et al.* (2010), a combinação adequada de máquinas para corte e extração pode aumentar a produtividade e minimizar o tempo ocioso das máquinas, melhorando a eficiência geral das operações de colheita florestal.

3.2 Fluxo de processo das simulações

Com a possibilidade de inserir os *Inputs* e realizados os ajustes nos algoritmos, foi possível visualizar o seguinte fluxo de processos, referente ao funcionamento do website (FIGURA 4).

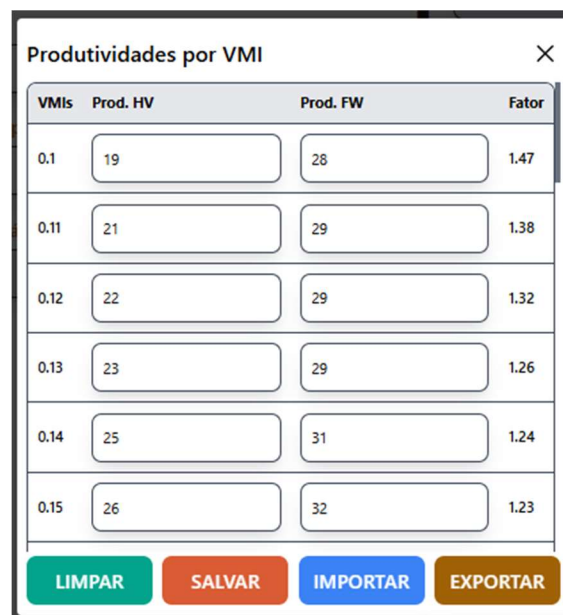
Figura 2 - Fluxo de processos das simulações



Fonte: O autor.

Então, foi adicionado ao *website* a opção “editar produtividades por VMI”, que permite ao usuário inserir suas próprias produtividades orçadas (tabela de ajuste), a fim de otimizar especificamente a razão entre HV / FW pretendida pelo usuário, de acordo com sua realidade de operação.

Figura 3 – Captura de tela da janela de customização de produtividades por VMI

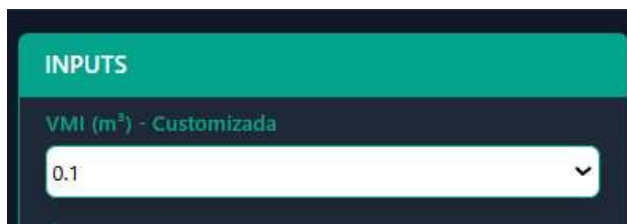


Fonte: *SimuCut*. Nota: Botões da interface da janela de customização do *website*, sendo eles: Limpar: apaga os valores de produtividades inseridas pelo usuário; Salvar: salva os valores para que

possam ser visualizados no *website*; Importar: importa dados baixados anteriormente; Exportar: faz o *download* dos dados inseridos pelo usuário.

Ao salvar as configurações inseridas, a curva de produtividades por VMI estará customizada (FIGURA 4). Com isso, o usuário irá visualizar os resultados de acordo com sua realidade de operação.

Figura 4 – Corte em captura de tela demonstrando interface do *website* ao utilizar dados customizados



Fonte: *SimuCut*

Nota-se que a ferramenta permite propiciar a otimização com a simulação em diferentes dados e cenários, de acordo com os fatores de interferência existentes na operação da qual o usuário deseja simular os resultados. Desse modo, podem ser gerados relatórios de forma ágil para suporte na tomada de decisão operacional.

A simulação da relação entre *harvester* e *forwarder* é necessária para otimizar a combinação de máquinas, resultando em um uso mais eficiente das máquinas e redução de custos operacionais, uma vez que auxilia na logística de operação e manutenção e contribui para a liberação mais eficiente de áreas para os processos florestais posteriores, como o carregamento de madeira e silvicultura. Nascimento *et al.* (2017) destaca a necessidade da constante busca por alternativas que visem o aumento de produtividade e redução de custos.

Os custos podem ser diminuídos com o uso adequado de máquinas e técnicas especializadas. É importante ressaltar que, embora sejam eficientes, as máquinas florestais estão sujeitas a diversos fatores que exigem planejamento especializado, como a densidade dos talhões, a topografia, o volume por árvore, entre outros. (RODRIGUES, 2024).

3.3 Interface da página

Ao final da programação do *website*, obteve-se como resultado uma interface simples e intuitiva, na qual o usuário pode visualizar em tempo real os resultados (*outputs*) gerados a partir dos dados inseridos nos *inputs* (Figura 2). A versão demonstrativa do *SimuCut* pode ser acessada no [link \(CLIQUE AQUI\)](#).

Figura 5 - Interface do *SimuCut*

The screenshot displays the SimuCut web interface, which is divided into three main vertical panels: INPUTS (green header), JORNADA DE TRABALHO (orange header), and OUTPUTS (purple header). The interface includes various input fields, dropdown menus, and a table for machine relations. At the bottom, there are buttons for 'LIMPAR', 'SALVAR PDF', and 'EDITAR PROD. VMI'.

INPUTS (Green Panel):

- VMI (m³) - Original: 0.1
- Arv/ha: 0
- Harvester:
 - Produtividade (m³) real: 0
 - EO (%) real: 0
 - DM (%) real: 0
 - Produção desperdada (m³): 0
 - Consumo em L/h: 0
 - Número de máquinas: 0
- Forwarder:
 - Produtividade (m³) real: 0
 - EO (%) real: 0
 - DM (%) real: 0
 - Produção desperdada (m³): 0
 - Consumo em L/h: 0
 - Número de máquinas: 0

JORNADA DE TRABALHO (Orange Panel):

- Faceta: 4x2
- Turnos: 2
- Férras e Suplentes: Não
- Total de máquinas: 0

OUTPUTS (Purple Panel):

Tempo: Corte (dias): 0, Baldeio (dias): 0, Dias de frente: 0

Relação adequada de máquinas:

	HV	FW
7	2	
11	3	
14	4	
18	5	
21	6	
25	7	
28	8	
32	9	

Consumo de combustível HV: L/h: 0, L/m³: 0, L/ha: 0

Consumo de combustível FW: L/h: 0, L/m³: 0, L/ha: 0

Operadores e material de corte: Operadores: 0, Sabres: 0, Correntes: 0

Nota: Limpar: apaga os dados inseridos pelo usuário; salvar PDF: faz o *download* de um arquivo PDF com as informações obtidas; Editar Prod. VMI: permite ao usuário customizar o algoritmo.

4. CONCLUSÕES

- O *website* foi desenvolvido através da utilização do *software Visual Studio Code*, com linguagem *JavaScript*.
- O *website* é capaz de fornecer suporte no planejamento em colheita florestal, a partir dos *inputs* fornecidos e algoritmos ajustados com base nos dados do usuário.

5. REFERÊNCIAS

Flanagan, D. (2020). **"JavaScript: The Definitive Guide: Master the World's Most-Used Programming Language."** *O'Reilly Media*

Chen, K. (2019). **"Visual Studio Code: End-to-End Editing and Debugging Tools for Web Developers."** *Packt Publishing*

Miksovsky, P., & Novak, P. (2020). **"Web Applications with JavaScript or Java: Build Dynamic Websites with Modern Technologies."**

PEGDEN *et al.* **Introduction to simulation using SIMAN.** São Paulo: Ed. McGraw Hill, 1990.

LINHARES, M. *et al.* Eficiência e desempenho operacional de máquinas harvester e forwarder na colheita florestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, SciELO Brasil, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 212–219, 2012. ISSN 1983-4063. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000200007>. Acesso em: 12 ago. 2024.

NASCIMENTO, D. *et al.* Análise técnica e econômica do Harvester operando em dois subsistemas de colheita de madeira. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 484-490, 17 mar. 2017. Revista Engenharia na Agricultura. <http://dx.doi.org/10.13083/reveng.v24i6.725>

RODRIGUES, Thayron Augusto. **Momento ótimo de substituição do harvester sob a influência de aspectos econômicos, declividade do terreno e volume da floresta.** 2024. 48 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2024.

SILVA, Arthur Araújo **Desenvolvimento do indicador de eficiência global de máquinas de colheita florestal.** 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017. Disponível em: <<https://locus.ufv.br//handle/123456789/29703>> Acesso em: 20 ago. 2024.

Spinelli, R., Hartsough, B. R., & Magagnotti, N. (2010). **Machine availability and utilization in harvesting operations.** *Journal of Forest Engineering*, 21(3), 19-26

CAPÍTULO II: UTILIZAÇÃO E APLICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES PARA TOMADAS DE DECISÃO NA COLHEITA FLORESTAL

1. INTRODUÇÃO

A gestão da colheita florestal em florestas plantadas envolve tomadas de decisão complexas, que levam em consideração diversos fatores econômicos, ambientais e de produção (BROZ *et al.*, 2017). Esses fatores são complexos e interdependentes. Nesse âmbito, o uso de simulações pode proporcionar o aperfeiçoamento do processo de planejamento florestal, uma vez que permite considerar e relacionar os principais aspectos envolvidos nas produtividades das máquinas para simular cenários em diferentes contextos operacionais. (PEZZIN, 2024).

Essa complexidade é maior quando observada ao longo do ciclo de produção, visto que o impacto das ações executadas pode gerar grandes prejuízos econômicos devido aos vários anos desde a plantação até a colheita. Dessa forma, é fundamental ter um suporte adequado e consistente para o processo de tomada de decisão (RONNQVIST *et al.*, 2015).

A experimentação com simulações é frequentemente adotada, pois permite modelar o comportamento desses sistemas com maior complexidade, oferecendo menores custos, maior segurança e rapidez em relação a testes com sistemas reais (HEINRICH, 2010). Isso pode ser feito através de experimentações numéricas que utilizam modelos lógicos e/ou matemáticos com o objetivo de representar o comportamento de um sistema e obter estimativas dos parâmetros que se deseja analisar (GOMES *et. al*, 2009). Portanto, é evidente a importância das simulações nesse contexto, visto que são recursos utilizados para analisar e aprimorar processos, visando a redução de custos (SAMPAIO, 2023).

Esse capítulo objetivou utilizar o *website* desenvolvido para aplicar as simulações no aprimoramento do planejamento operacional florestal, visando verificar a otimização da razão entre as quantidades de *harvesters* e *forwarders* e a predição

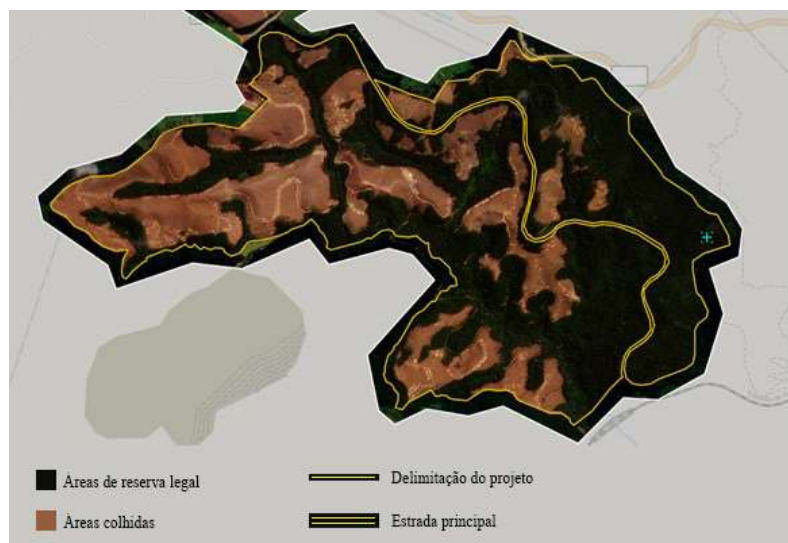
de dias necessários para produção de uma determinada área de trabalho, através da validação com testes em campo. Além disso, buscou demonstrar de modo ágil a conversão de unidades de consumo de combustível, dimensionar a quantidade de operadores e material de corte necessário e identificar aspectos que necessitam de ajustes para melhorar sua exatidão em diferentes condições.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do local do estudo

Os dados utilizados para validação dos resultados das simulações foram provenientes de uma área de colheita florestal localizada na região central de Minas Gerais, aproximadamente nas coordenadas latitude -19.93533 e longitude -43.57588, onde foram colhidos 74.555 m³ de madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* com declividade variando de 0 a 36°, durante os meses de março e abril de 2024 (FIGURA 6).

Figura 6 - Imagem satelital da área de estudo



Fonte: SCCON Geospacial, 2024.

Outro fator é o elevado número de nascentes e um grande bloco de Reserva Legal em sua porção direita. Essa característica favorece a elevada umidade no solo, que pode fazer com que haja mais eventos de patinação das máquinas, influenciando em eficiência operacional e produtividade. Além disso, é importante ressaltar a fragilidade de parte dos solos, que consistem em Cambissolos e Neossolos. Essa fragilidade torna o solo suscetível a processos erosivos, demandando uma atenção constante para evitar degradação.

Ademais, o local em estudo possui áreas de plantio e regeneração, além de fragmentos de reordenações e áreas remanescentes de colheitas anteriores. A área também apresenta apiários de parceiros, demandando um certo cuidado da operação tanto em questões de segurança dos operadores quanto sociais com a comunidade ao entorno.

2.2 Coleta de dados

Os dados coletados foram obtidos a partir das operações de corte e extração florestal, em plantios de clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* de uma empresa florestal localizada em Minas Gerais. Os *harvesters* de pneus utilizados foram do modelo 1270G, *John Deere*. Os *forwarders* utilizados foram do modelo 1910E, *John Deere*. Na totalidade, foram utilizadas 13 máquinas, sendo 7 *harvesters* e 5 *forwarders*. As máquinas apresentavam horímetros entre 4 e 6 mil horas.

Para os testes realizados, foram utilizadas máquinas de duas regiões da empresa, diferentes das que compuseram a configuração do algoritmo inicialmente. Para isso, foi utilizada a tabela de “configurar produtividades por VMI” do *SimuCut*, fazendo com que o simulador fosse aplicado em condições operacionais diferentes das quais foi configurado à princípio.

2.3 Caracterização dos dados

Os dados para validação do simulador foram coletados entre março e abril de 2024, passando por períodos secos e com chuva; diferentes operadores e paradas operacionais e de manutenção. O banco de dados angariado foi obtido a partir de relatórios operacionais extraídos do sistema interno da empresa, composto por apontamentos diários de boletins operacionais, feitos através do sistema *Track It*. Para validação do estudo, foram utilizados dados em manejo sem casca (SC) e inclinação de 0 a 28 graus.

2.4 Simulações

A validação do simulador investigou as seguintes proposições:

- ✓ **Simulação 1:** Relação entre quantidades de *harvester* e *forwarder*.
- ✓ **Simulação 2:** Predição de dias por área de trabalho, para transição de área de colheita.
- ✓ **Simulação 3:** Conversão de unidades de consumo de combustível.
- ✓ **Simulação 4:** Dimensionamento do número de operadores de acordo com a escala e estimativa de quantidade material de corte necessário.

Após elaboração dos algoritmos do *website* e definição dos parâmetros a serem utilizados, foram realizadas simulações e respectivos testes de validação em campo.

2.5 Análise de dados

Para analisar a eficácia do simulador em relação às combinações de quantidades de máquinas, foi utilizado o desvio padrão das produtividades de *harvesters* e *forwarders*, em um período de 33 dias. Foram fixadas as quantidades de

harvesters de 3 a 7, com quantidades de *forwarders* variando mais ou menos 1, em relação ao número de *harvesters*.

O desvio padrão (fórmula 1) é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados, indicando o quanto um conjunto de dados é uniforme. Quanto mais próximo de zero, menor a dispersão. O desvio padrão pode ser calculado pela seguinte fórmula (BARRETO *et al.*, 2014):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1)$$

Em que:

σ = desvio padrão;

x_i = cada uma das medições;

\bar{x} = média aritmética;

n = número de medições realizadas.

Dessa forma, entende-se que para que a otimização esteja sendo executada pelo simulador, é necessário que as combinações demonstradas na interface do *website* tenham menores desvios padrão do que suas variações com mais ou menos 1 *forwarder*, uma vez que no estudo de quantidades das máquinas, devemos considerar apenas valores inteiros. Para avaliar a linearidade entre os dias simulados e realizados, foi aplicada a correlação de Pearson.

Já para a análise do resultado de predição de dias por área de trabalho, foram realizadas simulações durante 26 dias para *harvester* e 33 dias para *forwarder* e comparadas com o tempo real restante para movimentação das máquinas ao final da produção da área. Para tal finalidade foi utilizado o teste *t* de *student*, visando entender se a diferença entre as duas amostras é estatisticamente significativa. Ou seja, caso a hipótese nula seja aceita, significa que não há evidência suficiente para afirmar se há uma diferença significativa entre as médias dos valores simulados e reais, o que sugere que o simulador está funcionando de maneira adequada, já que seus

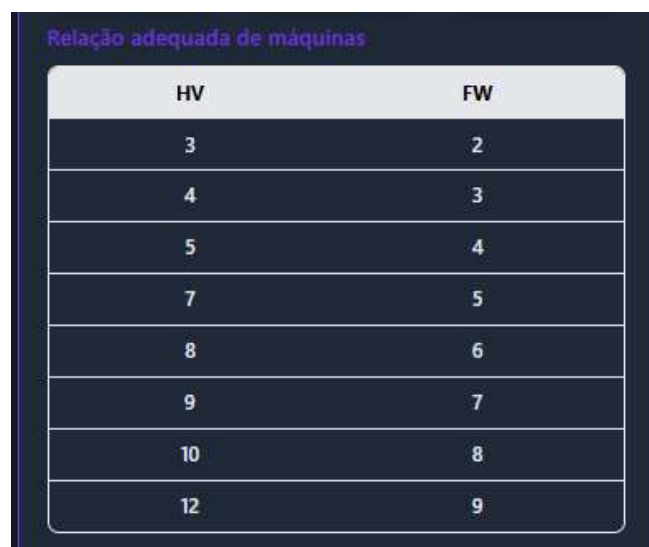
resultados estão alinhados com a realidade. Por outro lado, se a hipótese nula for rejeitada, há diferença significativa entre os dados e o simulador não representa a realidade. Ambas as análises foram feitas com utilização do *software Microsoft Excel*, através da funcionalidade “análise de dados”. Para as relações ótimas, foi considerado um mínimo de 3 *harvesters*, premissa existente devido ao número mínimo de máquinas que foram dispostas para os testes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Otimização das quantidades de máquinas

Para o cálculo das proporções, são utilizados valores arredondados, fato esse que garante o suprimento de madeira na unidade de trabalho e um menor número de máquinas ociosas ou subdimensionadas em campo. Ao inserir o VMI médio de 0,33 m³ proveniente da área em estudo para validação dos dados, o *Simucut* retornou a seguinte tabela de relação adequada de máquinas (FIGURA 7).

Figura 7 - Quantidade otimizada de *harvesters* e *forwarders*



HV	FW
3	2
4	3
5	4
7	5
8	6
9	7
10	8
12	9

Fonte: *SimuCut*.

Dentre as combinações ideais retornadas pelo simulador, optou-se por trabalhar com 4 *harvesters* e 3 *forwarders*, considerando a disponibilidade da empresa, por um período de 30 dias de efetivo trabalho. Tal relação dimensionada se mostrou eficaz nesse levantamento, do qual foram obtidos os seguintes valores de estoque de campo (TABELA 3):

Tabela 3 - Controle de estoque de campo

Dias	Estoque de campo (m³)
1	9226,8
2	9254,85
3	9373,65
4	9081,6
5	9098,1
6	9028,8
7	9243,3
8	8860,5
9	8428,2
10	8550,3
11	8781,3
12	9048,6
13	8962,8
14	9274,65
15	9386,85
16	9467,7
17	9530,4
18	9682,2
19	10043,55
20	10305,9
21	9933
22	9733,35
23	9746,55
24	9847,2
25	10040,25
26	10017,15
27	10018,8
28	9954,45
29	9923,1
30	9896,7

Nota: a tabela demonstra a variação do estoque, em m³, ao longo dos dias do mês.

Os valores de estoque vigente (equação 5) podem ser calculados pela diferença das produções diárias de *harvester* e *forwarder* (equação 4), que são obtidas

através dos produtos de produtividades (equações 2 e 3), pelo número de máquinas (n) e pelas horas trabalhadas, que envolvem eficiência operacional (EO), disponibilidade mecânica (DM) e número de turnos (t).

$$\text{Produção diária (HV)} = Pd \text{ (HV)} * EO * DM * t * n \quad (2)$$

$$\text{Produção diária (FW)} = Pd \text{ (FW)} * EO * DM * t * n \quad (3)$$

$$\text{Estoque diário} = \text{Produção diária (HV)} - \text{Produção diária (FW)} \quad (4)$$

$$\text{Estoque vigente} = \text{estoque anterior} + \text{estoque diário} \quad (5)$$

A partir das equações acima e dos dados obtidos em campo com as combinações geradas pelo simulador (Figura 7), foi possível calcular os desvios padrão das variações de *forwarders* (em mais ou menos um) em relação aos *harvesters*, para verificar a eficácia do simulador (TABELA 4).

Tabela 4 - Desvios padrão das combinações de máquinas

HV X FW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	6193,2	1483,61	3267,94							
4		5111,95	492,33	4357,26						
5			4035,04	810,49	5446,57					
7				6590	1923,63	2933,52				
8					5516,55	984,65	4017,43			
9						4450,82	782,28	5103,63		
10							3400,07	1620,98	6190,93	
12								5934,43	1476,98	3711,94

Nota: os valores de desvio padrão em negrito referem-se aos desvios das combinações específicas retornadas pelo simulador, enquanto os demais valores representam o desvio padrão com mais ou menos um *forwarder*. A primeira coluna refere-se às quantidades de *harvesters*, enquanto a primeira linha refere-se às quantidades de *forwarders*.

Considerando o desvio padrão da quantidade simulada pelo *SimuCut* como s_1 , e os desvios padrão ao reduzir ou adicionar 1 FG como s_2 e s_3 respectivamente, foi obtido o seguinte resultado (TABELA 5):

Tabela 5 - Comparativo dos desvios padrão

Quantidade simulada (HV x FW) (S ₁)	-1 FW (S ₂)	+1 FW (S ₃)	Desvio padrão
3x2	3x1	3x3	S ₁ < S ₃ < S ₂
4x3	4x2	4x4	S ₁ < S ₃ < S ₂
5x4	5x3	5x5	S ₁ < S ₂ < S ₃
7x5	7x4	7x6	S ₁ < S ₃ < S ₂
8x6	8x5	8x7	S ₁ < S ₃ < S ₂
9x7	9x6	9x8	S ₁ < S ₂ < S ₃
10x8	10x7	10x9	S ₁ < S ₂ < S ₃
12x9	12x8	12x10	S ₁ < S ₃ < S ₂

Nota: A primeira coluna representa as quantidades de *harvesters* (à esquerda) pelas quantidades de *forwarders* (à direita), separados por “x”.

Com isso, foi possível analisar que as combinações retornadas pelo simulador apresentam grau de dispersão de menor valor numérico do que quando alterada a quantidade de máquinas. Portanto, o estudo em questão demonstrou a otimização do sistema *cut-to-length* e que a efetividade da simulação de relação *harvester / forwarder* está ideal, uma vez que a variação do estoque de campo é menor do que nas demais combinações possíveis. Isso significa que existe maior estabilidade do estoque com a utilização dessas combinações, mitigando as necessidades de alteração no número de máquinas. Ainda nesse âmbito, foi possível constatar que os desvios padrão das combinações retornadas pelo simulador seguiram a seguinte ordem, do menor para o maior: 4x3 < 5x4 < 9x7 < 8x6 < 12x9 < 3x2 < 10x8 < 7x5, sendo 4x3 a combinação com maior estabilidade de estoque e 7x5 com maior variação de estoque.

É importante que existam sistemas de gestão que propiciem mecanismos para angariar informações sobre o gerenciamento de estoques e produção (BRITO e LARAICH, 2023). Lopes *et al.* (2021), ressaltam a essencialidade dessa gestão para evitar prejuízos. Além disso, diversos impactos ambientais podem ser gerados ao prolongar o tempo que a madeira permanece no campo, como alteração da paisagem, que pode gerar desorientação no local, afetando a relação com as comunidades que estão situadas próximo a operação (FERRAZ, 2020). As informações geradas permitiram a criação de cenários operacionais realistas, auxiliando na tomada de decisões.

A utilização de dados precisos em simulações pode melhorar a previsão da produtividade e eficiência das operações de colheita florestal (ERIKSSON e

LINDROOS, 2014). Logo, as simulações geradas pelo *SimuCut* apresentam-se como uma estratégia viável ao controle de estoque, através do dimensionamento de quantidade de máquinas a serem utilizadas.

3.2 Predição de dias por área de trabalho

A predição de dias necessários para a produção do saldo de madeira disponível é de suma importância para o planejamento de transporte das máquinas (transição entre áreas após finalizar a produção de determinada área). A simulação de dias por área de trabalho (TABELA 5) foi realizada a partir da inserção do saldo de produção (m^3 de madeira), produtividade das máquinas (m^3/h), eficiência operacional (EO%) e disponibilidade mecânica (DM%) no *SimuCut*.

Foram simulados durante 26 dias consecutivos com *harvester* e 33 com *forwarder* (TABELA 6). A precisão dos números simulados foi constatada a partir do dia de saída das máquinas da área em questão, validado em campo, e pode ser uma medida utilizada para estimar a aderência do simulador à realidade.

Tabela 6 - Registros de simulações de tempo necessário para operação, em dias.

DIAS	HV SIMULADO	HV REAL	FW SIMULADO	FW REAL
1	26,18	26	34,42	32
2	26,19	25	33,42	31
3	28,73	24	30,3	30
4	34,2	23	38,1	29
5	24,28	22	30,97	28
6	24,45	21	29,21	27
7	21,19	20	26,98	26
8	26,66	19	28,53	25
9	33,58	18	22,6	24
10	19,28	17	25,21	23
11	16,18	16	29,48	22
12	14,25	15	23	21
13	15,19	14	22,64	20
14	9,8	13	17,94	19
15	12,18	12	18,3	18
16	12,19	11	17,4	17
17	12,28	10	17,89	16

18	10,19	9	16,79	15
19	8,18	8	16,86	14
20	6,25	7	18,34	13
21	13,66	6	13,28	12
22	11,88	5	10,84	11
23	5,19	4	11,69	10
24	7,47	3	9,02	9
25	5,45	2	14,12	8
26	3,28	1	14,2	7
27	0	0	6,59	6
28	0	0	3,86	5
29	0	0	4,69	4
30	0	0	8,85	3
31	0	0	3,45	2
01	0	0	1,4	1
02	0	0	0	0

Nota: HV simulado e FW simulado referem-se aos valores que foram retornados pelo *SimuCut*. HV real e FW real referem-se aos dias restantes para transição de máquinas observados, com base no dia final de operação.

Na validação em campo, a finalização da produção da área com o *harvester* foi observada em 27 de março, seguido pelo *forwarder* em 02 de abril. A partir desses dados, foi realizado o teste *t* de *student* para verificar a diferença estatística, que teve como resultado t calculado < t crítico. Portanto, conclui-se que não há diferença significativa entre as amostras, demonstrando a assertividade da simulação no modelo calculado (TABELA 7).

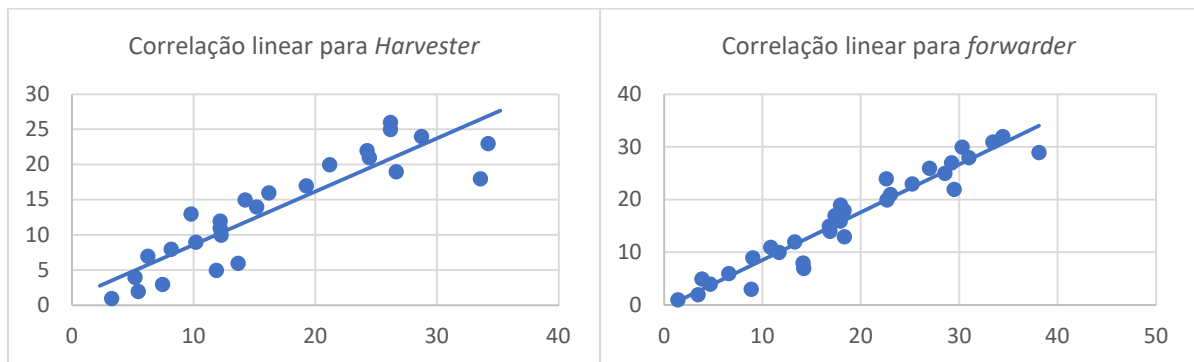
Tabela 7 - Teste *t* entre dados reais e simulados

	HV SIMULADO	HV REAL
Média	15,86518519	13
Variância	89,11134131	63
Observações	27	27
gl	51	
Stat t	1,207129271	
P(T<=t) uni-caudal	0,116475681	
t crítico uni-caudal	1,67528495	
P(T<=t) bi-caudal	0,232951362	
t crítico bi-caudal	2,00758377	
	FW SIMULADO	FW REAL
Média	18,1930303	16
Variância	107,1075718	93,5
Observações	33	33
gl	64	
Stat t	0,889463113	

P(T<=t) uni-caudal	0,188542714
t crítico uni-caudal	1,669013025
P(T<=t) bi-caudal	0,377085428
t crítico bi-caudal	1,997729654

Pelo coeficiente de correlação linear de *Pearson*, foram obtidos os valores de 0,90 para *harvester* e 0,97 para *forwarder*, demonstrando que os conjuntos de dados se movimentam de forma previsível, embora não seja uma correspondência perfeita. (TABELA 8).

Tabela 8 – Correlações lineares dos valores simulados em *harvester* e *forwarder*



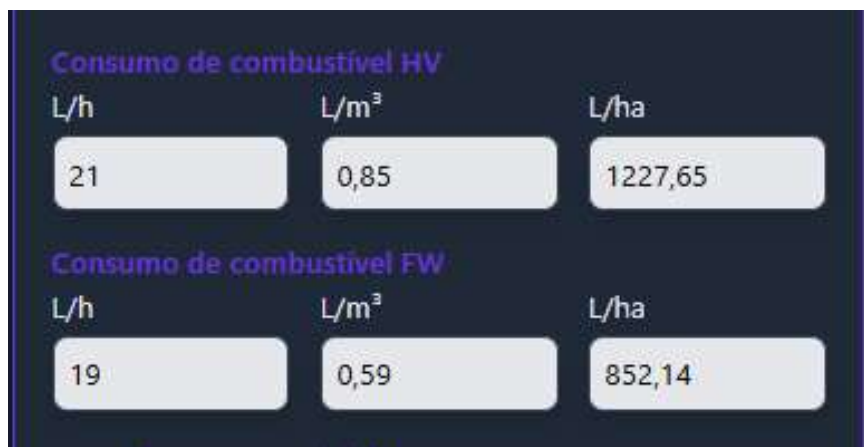
Destaca-se que o fato de não haver uma correspondência perfeita entre os valores simulados e reais de dias para a finalização e saída da área se deve aos fatores não modelados no simulador, que são ocasiões variáveis de condições operacionais e manutenção. Essa variação ocorre devido a fatores que podem ser imprevisíveis e incontroláveis, podendo ser devidos a demanda da unidade fabril; ocasionados por manutenções inesperadas; pluviometria exacerbada; reprogramação da sequência de colheita; adversidades frente a prestadores de serviço ou imprevistos de infraestrutura (NOLASCO, 2012).

Além disso, questões de conectividade também devem ser consideradas como obstáculos para predições em operações florestais, haja vista que muitas vezes as operações podem estar em zonas rurais remotas (SAMPAIO, 2023). Isso se deve ao fato que o tempo previsto de operação pode ser aumentado caso os sistemas de apontamento e telemetria não atuem plenamente, gerando paradas de manutenção de conectividade desses sistemas.

3.3 Análise da conversão de consumo de combustível

A análise do consumo de combustível pelo *SimuCut* utilizou os dados de consumo em litros de diesel por hora (L/h) informados, como *inputs*, para demonstrar a conversão em litros de diesel por metro cúbico de madeira (L/m³) e litros de diesel por hectare (L/ha), como *outputs*. A partir dos dados de produção e árvores por hectare inseridos, o *SimuCut* gerou relatórios com as métricas de consumo de combustível (FIGURA 8).

Figura 8 - Conversão de consumo de combustível no SimuCut



Fonte: O autor.

O consumo de combustível representa fração considerável dos custos das máquinas utilizadas na colheita florestal CTL, sendo juntamente com os custos de depreciação, o mais caro após o custo de manutenção (LIMA, 2021). Portanto, deve ser analisado continuamente em métricas variadas. Segundo Barros *et al.*, (2021), é essencial que ao efetuar o cálculo do custo das máquinas de colheita, seja levado em consideração o rendimento que está sendo realizado, ou seja, considerar não somente as horas despendidas, mas também o custo por m³ de madeira produzida.

3.4 Dimensionamento de quadro operadores e materiais de corte

No cálculo do material de corte simulado, foi utilizado como parâmetro na programação do algoritmo 3 sabres e 5 correntes para cada operador, sendo que o padrão de utilização é de 2 sabres e 4 correntes por turno, acrescido de um sabre e uma corrente reserva (em afiação), para resguardar a continuidade da operação.

O *SimuCut* dimensionou operadores em duas situações distintas. A primeira em uma escala 6x2, com 3 turnos e 4 operadores para cada máquina (1 operador em cada turno e 1 de folga). A segunda em uma escala 4x2, com 2 turnos e 3 operadores para cada máquina, sendo 1 em cada turno e 1 de folga, ambos os modelos possuem operadores adicionais para cobrir férias (FIGURA 9).

Figura 9 - Dimensionamento de quadro de operadores e materiais de corte

JORNADA DE TRABALHO		JORNADA DE TRABALHO	
Escalas	6x2	Escalas	4x2
Turnos	3	Turnos	2
Férias e Suplentes	Sim	Férias e Suplentes	Sim
Total de máquinas	7	Total de máquinas	7

Operadores e material de corte			Operadores e material de corte		
Operadores	Sabres	Correntes	Operadores	Sabres	Correntes
33	99	165	25	75	125

Fonte: *SimuCut*.

É interessante destacar que operadores de máquinas florestais trabalham em diversos regimes de escalas de trabalho, o que pode influenciar na produtividade e consumo de combustível. As diferenças entre as escalas envolvem variações de

características técnicas; financeiras; sustentáveis e ergonômicas e variam de acordo com as particularidades de cada organização.

Logo, é de interesse dos gestores florestais a análise de variações de escala, visando proporcionar melhores condições operacionais (SANTOS, 2021). No *SimuCut*, foi possível a realização da simulação desses diferentes cenários. Por fim, destaca-se que a validação em campo para a escala e turnos escolhidos como *Inputs* condizem integralmente com o calculado através do *SimuCut*.

4. CONCLUSÕES

- O *website* desenvolvido no capítulo 1 foi utilizado para aplicar as simulações no aprimoramento do planejamento operacional florestal.
- A eficácia da simulação de quantidades relativas ideais entre *harvesters* e *forwarders* no *SimuCut* foi verificada em campo, demonstrando que a razão entre as quantidades está otimizada, haja vista que os desvios padrão das razões simuladas é menor quando comparado aos desvios padrão de outras razões maiores ou menores. Isso significa que ao utilizar as quantidades simuladas, há menor grau de dispersão dos valores de estoque, que, portanto, se mantém mais constante ao longo dos dias estudados.
- A predição de dias necessários para produção de uma determinada área de trabalho também se mostrou eficaz, uma vez que de acordo com o teste *t* de *student*, não há diferença estatisticamente significativa entre os conjuntos de dados simulados e realizados em campo.
- A conversão de consumo de combustível se mostrou útil para realização de análises mais ágeis e proporciona melhor entendimento do cenário vigente.
- O dimensionamento de número de operadores e quantidade de material de corte pode auxiliar na agilidade da tomada de decisão administrativa em caso de necessidade de aumento ou diminuição do número de máquinas.
- Após comparativo dos testes e validações em campo, as simulações demonstraram ter aderência com a realidade, porém, destaca-se a não exatidão dos dados, devido a eventuais adversidades que podem ocorrer no âmbito de

condições operacionais ou paradas de manutenção, além de estarem submetidas a demais análises de cenário que precisam ser feitas em conjunto com os gestores e não podem ser simuladas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROZ, D. *et al.* 2017. Strategic planning in a forest supply chain: a multigoal and multiproduct approach. *Canadian Journal of Forest Research*. 47(3): 297-307. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0299>

BRITO, Matheus Alves do Amaral; LARAICH, Ovídio Alberto R. **A gestão de estoque e sua relação com os representantes de vendas numa indústria de confecção de roupas**. 2023. Estudo de caso. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia.

BARRETO, Wallacy Ferreira *et al.* Equação de volume para apoio ao manejo comunitário de empreendimento florestal em Anapu, Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Altamira, p. 322-239, jun./dez. 2014. Disponível em: <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/721/388>. Acesso em 23 ago. 2024.

BARROS, A.P. *et al.* Influência do volume por árvore e da distância de extração no desempenho do skidder em povoamentos de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 131, fev. 2021, p.1-12. Disponível em <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.19>. Acesso em: 16 jun. 2024.

ERIKSSON, M.; LINDROOS, O. "Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets." *International Journal of Forest Engineering*, v. 25, n. 3, p. 179-200, 2014.

FERRAZ, Camila Porfírio Albuquerque. **Análise de impactos e danos ambientais para colheita florestal mecanizada em sistema de toras curtas**. Dissertação (Mestrado em Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental) – Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Sorocaba, São Paulo, p. 78. 2020.

FERNANDES, Haroldo Carlos *et al.* **Avaliação das características técnicas e econômicas de um sistema de colheita florestal de árvores inteiras.** Scientia Forestalis (IPEF), v. 37, p. 225-232, 2009.

FIDELIS, A. C.; REIS, R. P. **Decisão no planejamento bianual da colheita florestal: o uso da programação inteira mista.** Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 39, p. 9-26, 2001.

GOMES, Luiz F.A.M; GOMES, Carlos, F.S; ALMEIDA, Adiel T. **Tomada de Decisão Gerencial – Enfoque Multicritério.** 3ª ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GONÇALVES, Alécio F. A COLHEITA FLORESTAL DO SÉCULO XXI. **Foco nas novas estruturas e tecnologias aplicadas à colheita mecanizada de corte raso de eucalipto.** (Especialista em Gestão Florestal) – Universidade federal do Paraná. Curitiba, 2008.

HEINRICH, Daniele. **Simulação da produção de madeira serrada.** Orientador: Dr. Antônio Carlos Gastaud Maçada. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LIMA, Potira Gabriella Mascarenhas da Silva. **Produtividade da colheita florestal mecanizada no Brasil: uma revisão sistemática (2001-2021).** Trabalho de conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

LOPES, Pablo Falco. **Autômato celular no planejamento de colheita florestal.** 2021. 83 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

MACHADO, C. C. **Colheita Florestal.** 3 ed., Viçosa: Editora UFV. 468. p. 2014

NOLASCO, Fábio Gomide. **Diagnóstico solução para problemas de mudanças de planejamento em sistemas computacionais de gestão florestal.** Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 75. 2012.

PEZZIN, Bruno Garuzzi. **Aplicação de redes neurais para a predição do volume de madeira extraído por hora de uma empresa produtora de celulose.** Trabalho de conclusão de Curso (Especialização em Ciência dos Dados) – Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2024.

OLIVEIRA, F. M.; **Revisão sobre a colheita de eucalipto em sistema de toras curtas (cut-to-length) no Brasil.** Revista da União Latino-americana de Tecnologia, Jaguariaíva, n.1 p. 42-54, 2013.

OLIVEIRA JÚNIOR, Ezer Dias de. **Análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto.** 2005. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba. 2005. Acesso em 03 de junho de 2024.

RONNQVIST, M. *et al.* Operations research challenges in forestry: 33 open problems. **Annals of Operation Research**, Published online, v. 232 p.11–40, 2015. Disponível em: <https://repositorio.uchile.cl/xmlui/bitstream/handle/2250/134864/Operations-Research-challenges-in-forestry.pdf?sequence=1>. Acesso em 05 mai. 2024.

SAMPAIO, Iara Silva. **Modelagem de um gêmeo digital para extração florestal com forwarder.** 93p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

SANTOS, Diego Weslly. Desempenho operacional de máquinas florestais em função do número de dias da escala de trabalho. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 64, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufra.edu.br/index.php/ajaes/article/view/3370/1615>. Acesso em 30 de maio de 2024.

Spinelli, Raffaele & Magagnotti, Natascia. (2011). **The effects of introducing modern technology on the financial, labour and energy performance of forest operations in the Italian Alps.** *Forest Policy and Economics*. 13. 520-524.

MALINOVSKI, Rafael Alexandre; **Programa computacional de simulação para análise de sistemas de colheita de madeira.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, p. 140. 1999.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É essencial explicitar que o uso de softwares e simulações tem se tornado fundamental na gestão de operações florestais, visto o grande avanço tecnológico nos âmbitos de ciência florestal; comunicação; conectividade; computação e análise de dados nos últimos anos. O simulador desenvolvido nesse trabalho buscou auxiliar de forma assertiva nas tomadas de decisão dos gestores de operações de colheita florestal, no sistema *cut-to-length* e tem como vantagens a facilidade de uso e a geração de relatórios para visualização ágil de cenários.

Porém, ainda existem diversos fatores que podem ser inseridos nos cálculos das simulações, para que haja maior precisão da ferramenta. Para isso, pode-se buscar também a calibração dos algoritmos através de outros parâmetros de interferências relevantes na produtividade, como: pluviosidade; classe e capacidade de sustentação de solo; qualidade de mão de obra; grau de sub-bosque; tipo de casca; distância média de extração; altura e largura média das pilhas; peso das árvores e tortuosidade, entre outros fatores.

A utilização de técnicas de análise de dados, aprendizado de máquina e inteligência artificial pode auxiliar na integração e correlação matemática entre esses fatores, com vista a proporcionar oportunidades para geração de informações para o gerenciamento operacional, aprimorando as práticas de planejamento e administração florestal.