

PABLO FALCO LOPES

**AUTÔMATO CELULAR NO PLANEJAMENTO DA
COLHEITA FLORESTAL**

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

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

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

T

L864a
2017 Lopes, Pablo Falco, 1978-
 Autômato celular no planejamento da colheita florestal / Pablo
 Falco Lopes. - Viçosa, MG, 2017.
 1 tese eletrônica (vii, 74 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Helio Garcia Leite.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 71-74.
Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/>

1. Madeira - Exploração - Planejamento. 2. Inteligência artificial.
3. Autômato celular. 4. Metaheurística. 5. Época de colheita. 6. Madeira
- Exploração - Simulação por computador. 7. Otimização matemática .
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.9322

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

PABLO FALCO LOPES

AUTÔMATO CELULAR NO PLANEJAMENTO DA COLHEITA FLORESTAL

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

APROVADA: 6 de outubro de 2017.



Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro
(Coorientador)



José Marinaldo Gleriani
(Coorientador)



Daniel Henrique Breda Binoti



Marcio Leles Romarco de Oliveira



Helio Garcia Leite
(Orientador)

Ao meu filho, Joaquim, pelo amor incondicional, pelos momentos de retorno à infância na mente de um adulto e aprendizado mútuo que evolui ao longo do tempo.

À Sinara, minha esposa, mãe do Joaquim, economista, inteligente, trabalhadora e que não mede esforços para cuidar de nós.

A todos meus ancestrais e bisavós, avós, tios e tias, primos e primas e, principalmente, meus Pais Urbano e Terezinha na busca contínua da transferência sobre como sobreviver e prosperar com felicidade, com fé, com amor e com princípios e valores éticos.

Aos meus guerreiros e amados irmãos, Rodrigo e Letícia, que sempre me apoiam e aconselham com a verdade de um legítimo amigo.

Ao amor e carinho de parentes da minha esposa, em especial, seus pais Renato e Luciene, que me receberam de braços abertos como membro de sua maravilhosa família.

A todos os apaixonados pela pesquisa operacional e inteligência artificial.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo apoio e amor incondicional.

Aos amigos, que ajudaram a praticar um pouco do ócio criativo.

A todos os professores e funcionários e parceiros da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial do Departamento de Engenharia Florestal da (DEF/UFV) e Sociedade de Investigações Florestais (SIF), pela transferência de conhecimento acumulado por gerações.

Ao amigo professor Helio Garcia Leite, pela orientação e pelo exemplo de vida. Um verdadeiro guru!

Aos professores Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro, e José Marinaldo Gleriani, pela coorientação e transferência de conhecimentos específicos, fundamentais para realização deste trabalho

À família Binoti, em especial, o amigo Daniel Henrique Breda Binoti, pela confiança, pelos diálogos, ensinamentos e pelo apoio no desenvolvimento do sistema desenvolvido.

A DAP Engenharia Florestal Ltda., pelo tempo cedido à dedicação do doutorado e pela busca contínua no desenvolvimento e implementação em escala operacional de tecnologias inovadoras que otimizam processos e maximizam o lucro de empresas do setor florestal.

Ao amigo e notável profissional, Antonilmar Silva, pelas considerações, pelo apoio e fornecimento de bases de dados.

À FAPEMIG, pelo financiamento do estudo.

BIOGRAFIA

PABLO FALCO LOPES, filho de Urbano dos Santos Lopes e Terezinha Pedro Falco, nasceu na cidade de Vitória, Espírito Santo, em 08 de dezembro de 1978.

Concluiu o Curso Primário na Escola Brasileira de Educação e Ensino e o científico na Escola de 1º e 2º Grau Nacional, ambas localizadas na cidade de Vitória, Espírito Santo.

Em 1998, ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em janeiro de 2005.

Em agosto de 2006, iniciou o curso de Mestrado em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa e concluindo-o em julho de 2017.

Em novembro de 2006, ajudou na criação da DAP Engenharia Florestal Ltda., onde ainda atua na busca contínua para desenvolvimento e implantação operacional de ferramentas que utilizam inteligência artificial como suporte a tomada de decisão para o setor florestal.

Em 2013 ingressou no Programa de Doutorado em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da tese em 06 de outubro de 2017.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Planejamento Florestal.....	3
2.2 Nível de Planejamento	5
2.3 Modelos de Planejamento Florestal	6
2.4 Pesquisa Operacional.....	6
2.5 Autômato celular (AC)	7
3 OBJETIVO	14
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1 Descrição dos Dados	15
4.2 Autômato Celular Proposto	18
4.3 Cenários Analisados	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1 Harvest Scheduling System	23
5.2 Cenários 1 a 10.....	37
5.3 Cenários 11 a 20.....	46
5.4 Cenários 21 a 30.....	56
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
7 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

RESUMO

LOPES, Pablo Falco, Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2017. **Autômato celular no planejamento da colheita florestal**. Orientador: Helio Garcia Leite. Coorientadores: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro e José Marinaldo Gleriani.

A inteligência artificial oferece tomadas de decisão automatizadas ao fazer uso de informações tabuladas na forma de variáveis capazes de explicar padrões de comportamento a um determinado nível de assertividade. Essa tese apresenta o desenvolvimento de um algoritmo de inteligência artificial que utiliza o conhecimento em autômatos celulares, grafos, regressão, busca heurística e simulação com objetivo de gerar cenários para o agendamento da colheita florestal otimizado e de forma autônoma, em função de variáveis, como custos, demanda de madeira, relevo, produtividade de máquinas, características da floresta, distância entre unidades de manejo, distância até o pátio de estocagem, crescimento e produção florestal, taxa de desconto, dentre outros. A discussão dos resultados foi realizada ao analisar o atendimento da demanda de madeira e o valor presente líquido (VPL) para um horizonte de 365 dias. O estudo conclui que a aplicação de critérios e regras simples em autômatos celulares para o planejamento florestal de curto prazo é capaz de otimizar o agendamento da colheita e maximizar o lucro para períodos anuais, mensais e diários. O sistema desenvolvido, *Harvest Scheduling System* (HSS) permite simular cenários para atendimento da demanda de madeira e produz resultados otimizados para o agendamento da colheita em tempo hábil. Cada um dos 30 cenários foi submetido a 1.000 iterações, variando critérios de vizinhança e regras de sorteio. Como produto deste trabalho, obteve-se um sistema capaz de otimizar o planejamento operacional da colheita florestal denominado Harvest Scheduling System (HSS), que utiliza a linguagem de programação Java, IDE (*Integrated Development Environment*) Netbeans 8.2, e JDK 8 (*Java Development Kit*). A aplicação de critérios e regras simples aos autômatos celulares para o planejamento florestal de curto prazo é capaz de otimizar o agendamento da colheita e maximizar o lucro para períodos anuais, mensais e diários. O sistema desenvolvido, Harvest Scheduling System (HSS) permite simular cenários para atendimento da demanda de madeira e produz resultados otimizados para o agendamento da colheita em tempo hábil.

ABSTRACT

LOPES, Pablo Falco, Universidade Federal de Viçosa, September, 2017. **Cellular automaton in forestry planning**. Advisor: Helio Garcia Leite. Co-Advisors: Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro and José Marinaldo Gleriani.

Artificial intelligence offers automated decision by using structured database with variables capable of explaining behavior patterns at a certain level of assertiveness. This study presents the development of an artificial intelligence algorithm that uses knowledge in cellular automata, graph theory, regression, metaheuristics and simulation in order to generate scenarios for optimized and autonomous forest harvesting scheduling by using variables such as costs, wood demand, terrain slope, machinery productivity, forest characteristics, distance between management units, distance to the stockyard, growth and yield, discount rate, among others. The discussion of the research was made by analyzing the wood supply and the net present value (NPV) in a time horizon of 365 days. The study concludes that the application of simple criteria and rules in cellular automata for short-term forest planning can optimize harvest scheduling and maximizing profit for annual, monthly and daily periods. The developed system “*Harvest Scheduling System – HSS*”, allows simulating scenarios to perform wood supply and optimized harvest scheduling in a timely manner. Each of the thirty scenarios was submitted to 1000 (one thousand) iterations with distinct neighborhood criteria and drawing rules. The “*HSS*” was developed based on Java programming language, Netbeans 8.2 Integrated Development Environment (IDE) and JDK 8 (Java Development Kit). Thirty scenarios were analyzed by applying six different co-evolution rules and five harvesting displacement costs (R\$/km) between management units. Each scenario was submitted to 1000 (one thousand) iterations generating the same number of viable solutions (Net Present Value - NPV). The most profitable solution for each of the neighborhood and draws rules is associated with a schedule that seeks to combine the harvesting displacement costs and other variables of influence such as: age; discount rate; yield for initial state; periodic daily increment; planting and maintenance cost; harvesting cost, transporting cost; restrictions; among others. The planting and maintenance cost and harvesting displacement costs are the variables that most influence the best solution choice. The current increment over the one-year harvest horizon represents 6 to 10% of revenue.

1 INTRODUÇÃO

A milênios o ser humano busca alternativas para otimizar a obtenção de recursos escassos. Esta busca levou ao desenvolvimento de algoritmos tão eficazes e eficientes na tomada de decisão de problemas complexos que está causando a quarta revolução industrial.

O planejamento e a gestão de empreendimentos florestais exigem a tomada de decisão, considerando diversos fatores internos e externos da empresa, sendo um processo complexo.

Alguns fatores que interferem no planejamento florestal são: nível técnico, condições de solo, topografia, nível de melhoramento florestal, tipo de plantio e tratos silviculturais. Em nível ambiental, é necessário obediência à legislação ambiental, conservação de áreas de proteção permanente e reserva legal, construção de corredores ecológicos, manejo da fauna silvestre.

Fatores de ordem social e política, como, por exemplo, relação da empresa com a população local e do entorno do empreendimento, relação com órgãos políticos e de fiscalização local, também devem ser considerados. Além desses fatores, a obtenção de lucros para os investidores e acionistas é de fundamental importância.

Toda a complexidade existente no planejamento florestal originou diversos estudos e ferramentas para auxiliar os gestores florestais na tomada de decisão. Contudo, em função da complexidade da interação e escala dos fatores, a formulação matemática e sua resolução por processos matemáticos tradicionais exige uma estrutura computacional em nível de *hardware* e *software*, às vezes não disponíveis em nível acadêmico ou comercial.

A complexidade encontrada pelos gestores florestais exige que as técnicas de modelagem matemática, abstração do problema, técnicas computacionais e conhecimento da estrutura do empreendimento sejam utilizadas de maneira a gerar o máximo de realismo operacional e eficiência computacional e matemática para a tomada de decisão.

Diversas técnicas de pesquisa matemática e de gestão já foram implementadas no setor florestal, visando a geração de planos de manejo otimizados e com o maior grau de realismo possível. Contudo, a utilização dessas ferramentas nem sempre gera soluções satisfatórias em nível temporal e grau de operacionalidade aceitáveis. Exemplos de sistemas são: RPF – Regulação da Produção Florestal (BINOTI, 2012) (Disponível em: www.dapflorestal.com.br), Planflor (TAUBE NETTO, 1984), Forplan – Forest Planning (IVERSON; ALSTON, 1986), SysFlor (RODRIGUES, 2001), SifPlan (Disponível em: www.treesoftware.com.br), Remsoft (Disponível em: www.remsoft.com) e OpTimber-LP (Disponível em: www.optimber.com.br). As principais deficiências encontradas referem-se, principalmente, ao procedimento de

modelagem matemática empregado e ao arcabouço tecnológico para a geração do modelo matemático e sua resolução.

As técnicas de modelagem matemáticas mais utilizadas são os modelos de programação linear e inteira mista, que se aplicam em situações com alto grau de certeza, em relação às entradas do modelo (RODRIGUES, 1997; RODRIGUES, 2001; BOUNGIORNO; GUILLES, 2003; DAVIS et al., 2005; CASTRO, 2007; BINOTI, 2012; GOMIDE et al., 2013).

Outra questão refere-se à necessidade de representação da modelagem matemática em relação às situações que ocorrem no mundo real, ou seja, o modelo deve representar fielmente o sistema a ser modelado (BANHARA, 2009; BINOTI, 2010). Nesse ponto, é importante considerar a limitação das informações disponíveis pelas empresas florestais e a possibilidade de modelagem de variáveis que, em alguns casos, apresentam comportamentos nem sempre de fácil compreensão.

Após a modelagem matemática, o gestor florestal, muitas vezes se depara com milhões de variáveis de decisão e centenas de inequações lineares (em alguns casos não lineares), possivelmente, com variáveis inteiras ou binárias, que exigem tempo e esforço computacional que podem inviabilizar a sua resolução (BINOTI, 2010)

Em função dessa complexidade e dificuldade, os gestores florestais são obrigados a ignorar algumas peculiaridades existentes no empreendimento, assumir algumas premissas e aplicar o modelo de planejamento, que pode não representar fielmente a realidade. Isto pode resultar em um planejamento não otimizado.

Neste estudo desenvolveu-se um algoritmo que utiliza técnicas de inteligência artificial, embarcado em um sistema computacional para resolução de problemas de planejamento operacional da colheita florestal.

A tese apresenta inicialmente uma síntese do estado da arte do planejamento florestal no Brasil. Em seguida, é apresentada uma abordagem sobre a utilização de técnicas de simulação. Apresenta-se, também, nesse trabalho, a ferramenta computacional desenvolvida e alguns casos de uso.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Planejamento Florestal

A evolução na capacidade de processamento de computadores e a disseminação do conhecimento em matemática e programação coloca as empresas atuais na quarta revolução industrial, e a inteligência artificial faz parte disso.

O planejamento florestal busca alocar fatores de produção (trabalho, capital e recursos naturais) de forma otimizada, com foco na obtenção de madeira de forma regulada e com o menor custo possível. Este desafio envolve uma enorme quantidade de informações para tomada de decisões, tornando praticamente impossível o cérebro humano enxergar a solução ótima ou próxima dela. Nesse sentido, a inteligência artificial (IA) se torna uma alternativa interessante, pois oferece a oportunidade de tomar decisões em função de variáveis armazenadas em bases de dados, submetidos a algoritmos matemáticos e processados por máquinas.

A alocação de recursos escassos é em grande parte controlada por decisões humanas sobre onde, quando e quanto colher de madeira. A natureza a longo prazo do processo de produção introduz incertezas quanto às condições temporais, econômicas, políticas, fisiológicas e patológicas, havendo, muitas vezes, um número ilimitado de estratégias de corte possíveis, resultando em complexidade (WARE; CLUTTER, 1971).

O planejamento florestal requer a formulação de um modelo de regulação florestal que possa indicar um fluxo contínuo de produtos madeireiros, em quantidade e qualidade desejadas, considerando as premissas do empreendimento florestal, além de fatores técnicos econômicos e sociais (DAVIS, 1966).

As florestas são, geralmente, geridas para o abastecimento sustentável de uma planta industrial que tenha como matéria prima a madeira. Esse abastecimento requer um nível de produção constante para uma determinada intensidade de produção (CAMPOS; LEITE, 2017). Isto significa que as taxas de crescimento e a colheita devem ser equilibradas. Assim, o rendimento sustentável não é necessariamente o que está sendo produzido, ou consumido hoje, mas, a produtividade da floresta e demandas em níveis atuais e futuros.

O modelo de regulação florestal deve ser capaz de representar com boa exatidão os rendimentos volumétricos (em quantidade e qualidade), operacionais e econômicos associados. Alterações no rendimento operacional das máquinas e dos equipamentos, ou variações nas taxas

de câmbio ou inflação, podem inviabilizar a solução apresentada pelos modelos (BINOTI, 2010).

O objetivo final do manejo florestal é a maximização da utilidade da floresta pelo proprietário. Se o empreendimento é orientado para o lucro, o objetivo do modelo de regulação geralmente pode ser medido em termos de valor presente líquido, retorno sobre o investimento, ou o custo de produção da madeira (BINOTI, 2012).

Apesar dos interesses econômicos nortear a maioria dos empreendimentos florestais, critérios sociais e ambientais estão influenciando de maneira significativa o processo de tomada de decisão. Esse fato adicionou uma complexidade ainda maior aos modelos de planejamento (WEINTRAUB et al., 2000; BINOTI, 2010).

A completa implementação dos modelos de regulação exige que restrições de ordem espacial sejam incorporadas ao modelo. Estas restrições modelam a distribuição espacial das frentes de colheita, distância a pontos de entrega de madeira e fonte de suprimentos, distribuição espacial da demanda de mão de obra e distribuição de impostos dentre outros (JORGENSEN, 2000; BETTINGER et al., 2009).

O planejamento prático da floresta não é apenas análise e otimização de preferências. Inventário, gerenciamento de dados, cálculo e simulação computacional desempenham papéis importantes no processo que leva a um plano florestal (WERNEBURG, 2015).

Ao planejar, são comparados diversos planos de manejo florestal alternativos, que também podem ser chamados de alternativas de decisão, visando encontrar uma decisão que tenha os melhores resultados possíveis, considerando os diversos efeitos e impactos (sociais, econômicos e ambientais) que essas possam causar (BASKENT; JORDAN, 1995; BOSTON; BETTINGER, 2001; RODRIGUES, 2002; BUONGIORNO; GUILLES, 2003; DAVIS et al., 2005; BETTINGER et al., 2009).

Vários modelos e técnicas de cálculo são utilizados para prever as consequências das alternativas de decisão (RODRIGUES, 2001). Isso exige prever o desenvolvimento dos plantios sob diferentes prescrições de manejo e calcular os valores desses produtos e serviços, que são importantes para o proprietário, bem como, os impactos ambientais e sociais resultantes desses planos de manejo.

As previsões usam simulação computacional de uma maneira bem simplória e são baseadas em dados de inventário florestal, curvas de crescimento e produção, variáveis econômicas e políticas, bem como em modelos e métodos de cálculo (PUKKALA, 2002).

2.2 Nível de Planejamento

As florestas geridas são divididas em áreas geograficamente identificáveis, definidas como unidades de manejo (CAMPOS; LEITE, 2017), estas unidades são compartimentos que apresentam algumas características semelhantes.

Todo ano deve-se programar o corte raso em algumas unidades de manejo. Normalmente, essas decisões não serão tomadas sem um estudo considerável e um planejamento de longo prazo. O plano de manejo é preparado listando as unidades de corte a serem colhidas durante o período de planejamento. Esta programação de corte pode listar as unidades programadas para a reforma, desbaste ou corte seguido de talhadia (BINOTI, 2012).

O planejamento florestal é definido em função do nível de abordagem e do objetivo, em: estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo) (WEINTRAUB; CHOLAKY, 1991; FEUNEKES; COGSWELL, 2000). O plano estratégico abrange toda a organização e tem como características principais o horizonte de planejamento de longo prazo, cerca de 18 a 21 anos em empresas nacionais.

O planejamento de longo prazo é definido pela alta direção da empresa, e assume premissas como: qual a capacidade de produção em médio e longo prazo; potencial de compra de novas terras; possibilidades de venda de ativos, dentre outros. Esse planejamento norteia os demais planos (WERNEBURG, 2015).

O planejamento tático considera um período de cerca de 3 a 6 anos, considerando planos pontuais, com relação à construção de postos de transbordo, mudança no meio de transporte, destinação diferenciada da madeira, dentre outras. Possui uma importante função como elo de ligação entre o planejamento estratégico e o operacional. O plano operacional possui um nível elevado de detalhamento, sendo executado para cada atividade do setor produtivo florestal. Por exemplo, a sequência de talhões para colheita, a sequência de plantio, equipes de adubação e monitoramento. Geralmente, possui como horizonte entre 12 e 18 meses (RODRIGUES, 2001; SESSIONS et al., 2007; BETTINGER et al., 2009; WERNEBURG, 2015). Tem sido observada uma queixa rotineira entre especialistas do setor florestal de que o planejamento florestal estratégico, tático e operacional apresentam uma baixa interação entre si.

Existem muitas possibilidades para justificar o não cumprimento do planejamento em nível operacional. Uma delas é a ausência de técnicas matemáticas e computacionais capazes de atualizar em tempo real os três níveis de planejamento de forma exequível.

2.3 Modelos de Planejamento Florestal

Os modelos estratégicos de planejamento florestal são comumente resolvidos por técnicas de programação matemática (RODRIGUES, 2001; BINOTI, 2012). Modelos táticos e operacionais de planejamento florestal são comumente resolvidos por meio de simulações em planilhas eletrônicas, muitas vezes sem otimização.

Modelos matemáticos de planejamento florestal podem ser resolvidos por algoritmos exatos de programação linear, algoritmos heurísticos ou inteligência artificial (RODRIGUES, 2001, 2003, 2004a, 2004b; BOUNGIORNO; GUILLES, 2003; PUKKALA; HEINONEN, 2006; DAVIS et al., 2005; MATHEY et al., 2005, 2007; CASTRO, 2007; HEINONEN; PUKKALA, 2007; MOREIRA, 2008; BETTINGER et al., 2009; BINOTI, 2012; ARAÚJO, 2016).

2.4 Pesquisa Operacional

A pesquisa operacional tem sido importante na análise para resolução de problemas envolvendo o uso de recursos naturais, especificamente na agricultura, pesca, silvicultura e mineração. Estas quatro áreas de aplicação são bastante distintas. Os horizontes temporais de crescimento e extração (ou colheita) variam de meses a ano para a pesca e a agricultura, a quase décadas para algumas espécies arbóreas (WEINTRAUB et al., 2007).

O uso de modelos de pesquisa operacional no planejamento florestal começou no início dos anos de 1960, como desenvolvimentos teóricos e operacionais, conforme relatado e apresentado no modelo TimberRam. O Sistema TimberRam, desenvolvido pelo Serviço Florestal dos EUA, viabilizou a geração dos modelos, resolução e apresentação dos resultados (NAVON, 1971).

Os desenvolvimentos básicos nos anos de 1970 incorporaram o uso múltiplo e nos anos de 1980 e 1990, aspectos ecológicos, biodiversidade, vida selvagem e preservação passaram a ser incorporadas nos modelos. Isto resultou no desenvolvimento de algoritmos interessantes, principalmente, de natureza combinatória, usados para possibilitar a inclusão de propriedades espaciais necessárias para caracterizar restrições ambientais e sociais (RODRIGUES et al., 2006; CASTRO, 2007; BINOTI, 2012). Neste contexto, a incorporação de incertezas e os múltiplos objetivos têm resultado em proposições metodológicas e acadêmicas (ARAÚJO, 2016).

Anteriormente à introdução dos modelos de pesquisa operacional, as decisões eram apoiadas por modelos de análise manual ou de simulação. Embora a simulação ofereça ampla flexibilidade nos processos de decisão, ela tem limitações para encontrar soluções ótimas (GADOW; PUKKALA, 2008). Esse foi o caso no planejamento florestal, já que as exigências de ter produção constante ao longo do tempo, regulação e restrições operacionais provaram ser difíceis de determinar sem o uso de modelos de pesquisa operacional.

Nos modelos de colheita precoce, as questões ambientais eram tratadas implicitamente, eliminando certas práticas de colheita ou deixando algumas áreas de lado. A crescente necessidade de incluir múltiplos usos limitou a utilização desses modelos e levou ao desenvolvimento de modelos que incorporaram múltiplos usos, como recreação, alcance e, principalmente, considerações ambientais. Isso levou o Serviço Florestal dos Estados Unidos à introdução do FORPLAN, que aborda as muitas preocupações dos valores não madeireiros, onde diferentes usos da floresta são considerados iguais, sendo a colheita de madeira um deles (JOHNSON et al., 1986).

A programação linear (PL) é um dos métodos mais utilizados para resolver problemas de manejo florestal de longo prazo (WARE; CLUTTER, 1971; DARGAVEL; BETHUNE, 1972; JOHNSON; SCHEURMAN, 1977; LEUSCHNER, 1990). Uma razão para isso é a eficiência computacional de LP. Outra é a versatilidade pela qual uma matriz de restrição pode ser formada a partir de esquemas de tratamento gerados por praticamente qualquer modelo de projeção de estandes (OHMAN; ERIKSSON, 2002). A aplicação da PL para o manejo de plantações é direcionada para o controle de produção.

2.5 Autômato celular (AC)

No século XVII, autores como Gottfried Wilhelm Leibniz e Blaise Pascal desenvolveram calculadoras mecânicas. A noção de “algoritmo” foi introduzida por Church (1936), com a ideia da *calculabilidade efetiva*. Turing (1936) comenta que esse trabalho de Church é equivalente a *Máquina de Turing*, mas diferenciam-se pela sua definição.

Ao estudar como os humanos tomam decisões, Turing (1936) desenvolveu a teoria de uma máquina capaz de ler e escrever símbolos em uma fita unidimensional a partir de regras pré-estabelecidas. Essa máquina possuía um *sensor* capaz de ler o símbolo escrito em uma célula da fita e tomar uma decisão de comando para que a máquina escreva em uma determinada posição da fita, mude de posição, ou permaneça parada ao obedecer a um conjunto de regras em instantes de tempo t distintos.

A tecnologia capaz de executar a teoria da *Máquina de Turing* surgiu na década de 1940 com advento da Segunda Guerra Mundial. Nessa década, ao estudar o comportamento de organismos vivos e características do cérebro, John Von Neumann desenvolveu a teoria de autorreprodução de um autômato celular ao aplicar um conjunto de critérios e regras de vizinhança em uma matriz bidimensional, onde cada célula desse espaço possuía um número finito de estados entre o tempo $t - 1$ e t (NEUMANN, 1966).

Gardner (1970) publicou *The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life"*. O verdadeiro idealizador deste trabalho, John Horton Conway, trabalhou com “jogos de simulação” que se assemelham aos processos da vida real, realizou analogias com o aumento, o declínio e as alterações de uma sociedade de organismos vivos. Os estudos realizados por este autor levaram à criação do chamado “jogo da vida” (*game of life*), no qual, a partir de um estado inicial os organismos podem nascer, morrer ou sobreviver ou quando submetidos a regras simples que, após um longo período de tempo, devem satisfazer três critérios:

1. Não deve existir um padrão inicial para o qual haja uma prova simples de que a população pode crescer indefinidamente;
2. Deve haver padrões iniciais que aparentemente cresçam indefinidamente; e
3. Deve haver padrões iniciais simples que crescem e mudam por um período de tempo considerável antes de chegar ao fim pelas seguintes maneiras possíveis: desaparecer completamente devido à sub ou superpopulação, estabelecendo-se em uma configuração estável que se mantém imutável, ou entrando em uma fase oscilante na qual são repetidos ciclos infinitos de dois ou mais períodos.

Para atender esses critérios, as regras simples são aplicadas em cada célula de um tabuleiro de xadrez de dimensão infinita de forma que o comportamento da população se torne imprevisível. As regras são:

1. Sobrevivência – cada célula com dois ou mais vizinhos no instante $t - 1$ sobrevive no instante t ;
2. Morte – cada célula com quatro ou mais vizinhos no instante $t - 1$ morre de superpopulação no instante t ; e
3. Nascimento – cada célula morta com exatamente três vizinhos vivos no instante $t - 1$ nascerá no instante t .

No jogo da vida de Conway, a sobrevivência, os nascimentos e as mortes ocorrem de forma simultânea, para todas as células do tabuleiro, entre a geração inicial do instante $t - 1$ e a nova geração resultante no instante t .

Estudos abrangentes de autômatos celulares incluindo a linguagem matemática foram realizados por S. Wolfram, a partir da década de 1980. A pesquisa fundamental de Wolfram no campo culminou na publicação de seu livro *A New Kind of Science* (WOLFRAM, 2002), que apresenta uma gigantesca coleção de resultados relativos a autômatos e uma série de novas descobertas.

A Figura 1 mostra a sequência de sete instantes de tempo (t) para o estado inicial de cinco células/autômatos com vida (amarelo) e 31 mortas (cinza) em um *grid* com duas dimensões (6 x 6).

Wolfram (2002) descreve que um autômato celular é uma coleção de células que assume estados distintos em uma grade, de forma e tamanho especificados, que evolui através de instantes de tempo discretos, de acordo com um conjunto de regras que são baseadas nos estados das células vizinhas e aplicadas iterativamente pela quantidade de instantes definidos pelo modelador. De acordo com esse mesmo autor, autômato celular (AC) é um modelo prototípico para sistemas e processos complexos, que consiste em um grande número de componentes idênticos, simples que se interagem localmente.

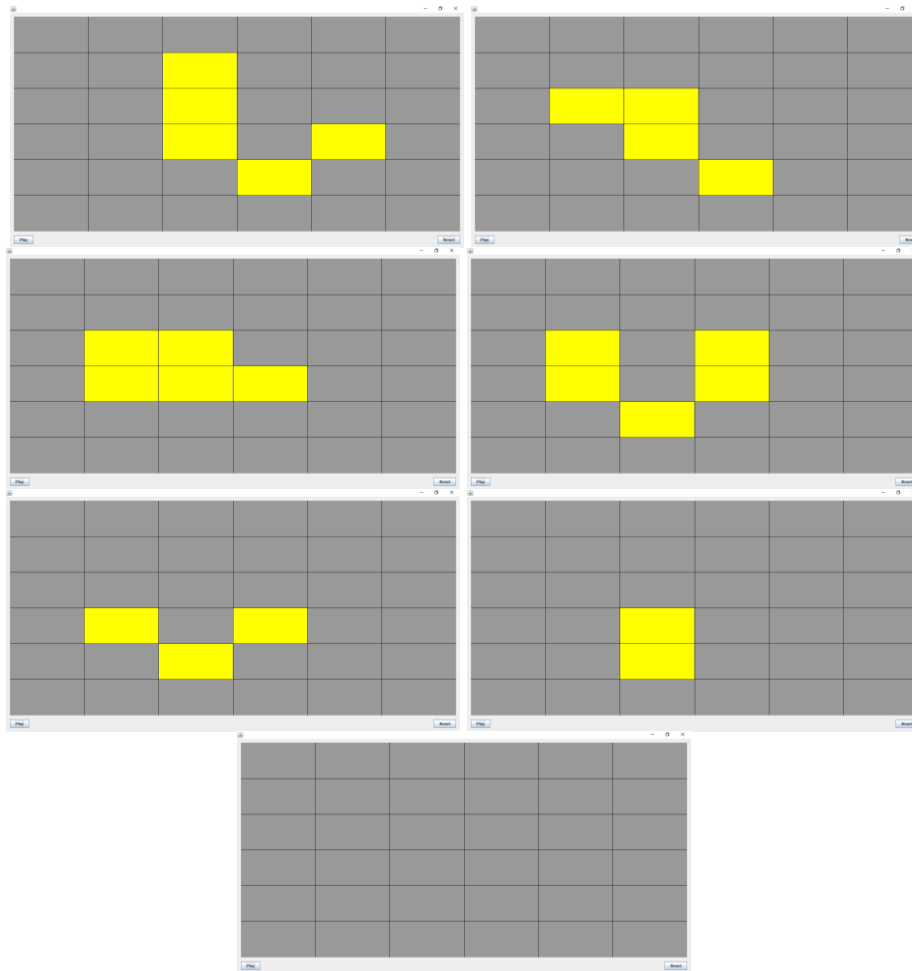
Sendo assim, um autômato celular pode assumir o endereço de cada célula contida em uma matriz de dimensão n e sofrer mudanças de estado por um período de tempo finito ou infinito, dependendo dos critérios e regras de vizinhança a serem aplicadas simultaneamente entre os instantes de tempo inicial ($t - 1$) e futuro (t).

O tipo mais simples de autômato celular é um autômato binário, vizinho mais próximo e unidimensional.

O estudo desses sistemas gerou grande interesse ao longo dos anos devido em virtude da capacidade de gerar um rico espectro de padrões de comportamento muito complexos, a partir de conjuntos de regras subjacentes relativamente simples. Além disso, eles parecem capturar muitas características essenciais do comportamento cooperativo auto-organizado complexo, observado em sistemas reais (WOLFRAM, 2002).

Apesar de tratarmos as regras como “simples”, isso não quer dizer que idealizá-las seja tão simples quanto parece. No entanto, elas realmente são de simples interpretação após sua idealização.

Figura 1 – Sequência de sete instantes de tempo (t) da esquerda para direita e de cima para baixo; instante inicial com cinco autômatos vivos (amarelo) e 31 mortos (cinza); grid bidimensional (6 x 6).



Fonte: dados da pesquisa.

Embora exista uma enorme variedade de modelos de AC particulares – cada um adaptado para atender aos requisitos de um sistema específico – a maioria dos modelos possui essas cinco características genéricas:

1. Estrutura discreta de células: o ambiente do sistema consiste em uma rede de células de uma, duas ou três dimensões;
2. Homogeneidade: todas as células são equivalentes;
3. Estados discretos: cada célula assume um número finito de possíveis estados discretos;
4. Interações locais: cada célula interage apenas com células que estão em sua vizinhança local; e

5. Dinâmica discreta: em cada unidade de unidade discreta, cada célula atualiza seu estado atual de acordo com uma regra de transição levando em consideração os estados das células em sua vizinhança.

Embora grande parte do trabalho teórico com AC tenha sido dedicado à matemática e à ciência da computação, inúmeras aplicações que envolvem foram desenvolvidos com o passar do tempo, principalmente por causa da sua estrutura simples e com grande potencial de paralelismo com o mundo real. Alguns exemplos específicos de fenômenos que foram modelados por AC incluem turbulência fluida e química (D'HUMIERES; PLALLEMAND, 1986), crescimento de plantas (LINDEMAYER; PRUSINKIEWICZ, 1987), formação de estruturas espacialmente ordenadas em sistemas químicos (GERHARDT; SCHUSTER, 1989), incêndios florestais (BAK et al., 1990), padrões de atividade elétrica em sistemas neurais (FRANCESCHETTI et al., 1993), modelagem ecológica populacional e de ecossistemas (PHIPPS, 1992), dinâmica social (EPSTEIN; AXTELL, 1996), planejamento da paisagem visando prever o efeito do crescimento urbano em habitats naturais (SYPHARD et al., 2005), planejamento florestal (HEINONEN; PUKKALA 2007) e modelagem do crescimento e produção em nível de distribuição de diâmetros (BINOTI et al., 2012), dentre outros.

Wolfram (2002) lista pelo menos quatro motivações parcialmente sobrepostas para o estudo da AC, dentre elas:

1. Computação Paralela – Os AC permitem implementações computacionais paralelas muito eficientes, para uma análise detalhada de muitos processos dinâmicos simultâneos na natureza. Em função das diversas células e relações locais, essas podem ser tratadas como processos independentes para cada época de processamento. Este fato permite gerar simulações e repetições de maneira facilitada;

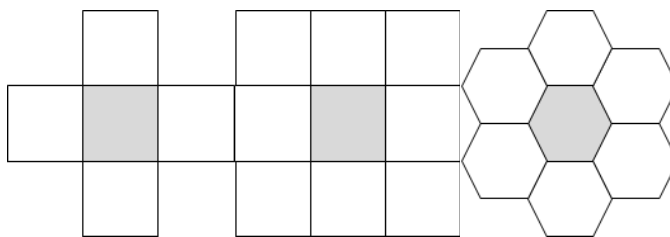
2. Simulador de sistemas dinâmicos discretos – Os AC permitem a investigação sistemática de fenômenos complexos, incorporando qualquer tipo de elemento físico desejável. Qualquer relação que possa ser definida em qualquer escala discreta pode ser simulada. Este fato inclui variáveis contínuas que possam ser segmentadas;

3. Como veículos conceituais para estudar formação e complexidade de padrões; e

4. Como modelos originais da física fundamental, que apresentam pouca ligação com o estudo em questão.

Os autômatos podem assumir diferentes formas e tamanhos. Além disso, o critério de vizinhança também pode variar (adjacência ou proximidade) (WOLFRAM, 2002). A Figura 2 contém três exemplos de forma quadrada e hexagonal com critérios de vizinhança por adjacência e/ou vértice.

Figura 2 – Exemplos de vizinhanças utilizadas em autômatos de duas dimensões.



Fonte: dados da pesquisa.

Em sistemas biológicos, a vizinhança pode e deve ser alterada para melhor expressar a relação entre os objetos e as células modeladas. Células irregulares e não simétricas podem ser utilizadas. No caso do planejamento florestal, o critério de vizinhança por proximidade pode ser estabelecido pelas distâncias entre unidades de manejo.

De modo geral, o estado do conjunto de células formado pelos autômatos varia de acordo com regras simples e determinísticas. O estado de uma célula no instante t é uma função do estado de um número finito de células vizinhas no instante $t-1$. Cada vez que as regras são aplicadas ao conjunto de células, uma nova geração é produzida.

Embora seja comum pensar que AC é uma técnica de modelagem extremamente abstrata, ou apenas simplificações para aplicações de outras técnicas, o seu poder real reside no fato da geração de representações simples, onde as regras locais possam ser deduzidas e assim gerar um fenômeno complexo.

A modelagem para a tomada de decisão no encontro entre um gato e um rato pode ser dada da seguinte forma: regra do gato – tentarei capturar o rato enquanto eu tiver fôlego; regra do rato – se o gato parar de correr eu também paro, caso contrário, continuarei correndo até morrer. Ao aplicar essa linha de raciocínio em um computador, pode-se programar um algoritmo capaz de modificar o estado do um autômato “gato”, no tempo $t-1$, para células mais próximas do autômato “rato”, no tempo t , fazendo uso de uma rotina que identifica o gradiente da célula onde o rato se encontrava no instante $t-1$. Também é possível criar uma regra que o rato mude de estado a cada dois instantes e o gato a cada instante, na tentativa de fazer com que o gato tenha o dobro da velocidade de rato. Ainda, podemos criar um autômato estático que pode receber o rato, mas não o gato, como se o rato tivesse entrado na toca.

Modelos matemáticos desenvolvidos com o conceito de autômatos celulares tem a capacidade de solucionar problemas operacionais complexos dinâmicos e geoespacializados ao aplicar critérios e regras simples, sendo este um dos motivos para utilizá-lo no planejamento da colheita florestal otimizado.

A modelagem matemática para algoritmos de inteligência artificial busca utilizar variáveis que fornecem suporte ao raciocínio lógico humano na tomada de decisão. É difícil aceitar isso, mas é um fato.

3 OBJETIVO

- Desenvolvimento de um algoritmo de inteligência artificial que utiliza o conhecimento em autômatos celulares, grafos, regressão, busca heurística e simulação, com objetivo de gerar cenários para o agendamento da colheita florestal de curto prazo otimizado e de forma autônoma, em função de variáveis, como, custos, demanda de madeira, relevo, produtividade de máquinas, características da floresta, distância entre unidades de manejo, distância até o pátio de estocagem, crescimento e produção florestal, taxa de desconto, dentre outros.

- Embarcar a modelagem desenvolvida em um *software*.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição dos Dados

As estratégias de modelagem utilizadas neste estudo foram aplicadas em um povoamento florestal de eucalipto localizado no estado de Minas Geras, contendo 100 unidades de manejo florestal (UM). Suas principais características são apresentadas na Tabela 1.

A produção para cada unidade de manejo em cada ponto no tempo foi obtida pelo modelo de Gompertz ajustado com dados de inventário florestal contínuo, conforme apresentado abaixo.

$$V_f = V_a \beta_0 e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 I_f}} / e^{-e^{\beta_1 - \beta_2 I_a}} + \varepsilon \quad (1)$$

em que

V_a = volume observado na idade do inventário florestal (I_a), em $m^3 \text{ ha}^{-1}$;

V_f = o volume na idade de interesse (I_f), em $m^3 \text{ ha}^{-1}$;

$I_a e I_f$ = idades atual e futura, em meses;

e = exponencial;

$\beta_0, \beta_1 e \beta_2$ = parâmetros; e

ε = erro aleatório, $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

O custo de formação florestal para floresta em primeira ou segunda rotação foi estimado considerando diferentes valores em função da inclinação do terreno.

A produtividade e o custo das máquinas que realizam a colheita foram obtidos ao aplicar os modelos de regressão ajustados por Leite (2012). Constantes foram aplicadas nessas expressões para correção monetária e adaptação do rendimento médio esperado para a floresta, sendo:

$$Pc = ((Pha + Phd) / 2) + ((Pfa + Pfd) / 2) \quad (2)$$

$$Cc = ((CPha + CPhd) / 2) + ((CPfa + CPfd) / 2) \quad (3)$$

$$Pha = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 d + \beta_3 v^2 + \beta_4 v + \varepsilon \quad (4)$$

$$Phd = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 d + \beta_3 v^2 + \beta_4 v + \varepsilon \quad (5)$$

Tabela 1 – Estrutura da floresta destinada ao agendamento da colheita.

Número da Unidade de Manejo										Área (ha)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	17	36	62	33	34	59	10	15	51	32
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	40	33	90	69	28	37	56	56	110
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	100	54	49	77	77	44	26	106	143	85
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	28	45	45	55	39	33	33	69	36	51
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	8	103	31	53	53	107	80	45	45	52
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	77	70	82	67	60	49	60	12	55	31
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	21	60	30	39	43	20	103	36	55	27
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	58	30	54	12	10	31	38	38	171	53
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	37	66	61	38	38	29	38	27	5	80
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	13	12	63	19	65	40	51	45	4	72

Rotação										Idade (anos)									
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	5,6	5,6	5,6	5,1	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	7,5
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7,4	7,4	7,5	7,3	7,3	7,6	2,1	2,2	2,3	2,4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7,2	7,2	7,2	7,3	7,3	5,3	5,4	5,4	5,4	5,4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,5	5,4	5,4	5,4	5,4	5,3	5,4	5,3	5,3	5,3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,4	20,7	20,8	20,8	20,8	4,8	4,8	4,9	4,9	4,9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5,6	5,6	3,0	2,7	3,0	2,4	2,4	2,4	29,8	4,0
2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	4,0	26,2	3,1	3,0	3,0	3,0	5,2	5,2	5,1	5,1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4,7	4,7	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	4,9	4,9

Volume (m³.ha-1)										Distância até a fábrica									
256	226	242	338	296	225	229	230	154	157	100,0	100,5	101,0	101,5	102,0	102,5	103,0	103,5	104,0	104,5
216	235	291	257	306	281	438	299	467	252	100,5	100,7	101,1	101,6	102,1	102,5	103,0	103,5	104,0	104,5
216	298	258	257	282	259	488	75	113	244	101,0	101,1	101,4	101,8	102,2	102,7	103,2	103,6	104,1	104,6
235	252	244	631	254	244	509	119	53	238	101,5	101,6	101,8	102,1	102,5	102,9	103,4	103,8	104,3	104,7
195	261	244	654	254	341	579	52	53	250	102,0	102,1	102,2	102,5	102,8	103,2	103,6	104,0	104,5	104,9
260	278	179	491	248	320	302	70	102	138	152,5	152,5	152,7	152,9	153,2	153,5	153,9	154,3	154,7	155,1
264	203	59	805	284	337	202	67	137	136	153,0	153,0	153,2	153,4	153,6	153,9	154,2	154,6	155,0	155,4
246	215	44	578	273	342	267	67	210	238	153,5	153,5	153,6	153,8	154,0	154,3	154,6	154,9	155,3	155,7
216	215	70	193	273	337	294	372	169	245	154,0	154,0	154,1	154,3	154,5	154,7	155,0	155,3	155,7	156,0
215	216	53	448	233	340	222	140	184	123	154,5	154,5	154,6	154,7	154,9	155,1	155,4	155,7	156,0	156,4

Declividade (graus)										VMI									
18	12	18	4	18	18	18	18	21	9	0,234	0,209	0,223	0,323	0,242	0,212	0,259	0,249	0,173	0,139
18	12	18	4	18	18	4	18	1	9	0,200	0,171	0,276	0,351	0,300	0,286	0,401	0,245	0,699	0,190
18	12	18	4	18	18	4	18	18	18	0,271	0,224	0,253	0,351	0,250	0,257	1,445	0,069	0,113	0,274
18	18	18	4	18	18	4	10	18	18	0,233	0,279	0,214	0,679	0,251	0,217	0,601	0,105	0,050	0,257
18	12	18	4	18	18	4	18	18	18	0,218	0,273	0,214	0,770	0,251	0,312	0,738	0,056	0,050	0,257
12	18	18	4	18	18	9	10	18	18	0,271	0,266	0,168	0,606	0,225	0,330	0,270	0,059	0,096	0,141
12	18	10	4	18	18	9	10	18	18	0,234	0,211	0,043	0,765	0,278	0,333	0,174	0,059	0,140	0,133
12	9	10	4	18	18	18	10	18	18	0,300	0,241	0,040	0,619	0,267	0,306	0,276	0,059	0,210	0,304
12	9	10	4	18	18	18	1	18	18	0,256	0,241	0,062	0,324	0,267	0,334	0,283	0,644	0,188	0,217
12	18	10	4	18	18	18	21	18	18	0,209	0,216	0,045	1,657	0,248	0,341	0,244	0,157	0,179	0,131

Fonte: dados da pesquisa.

$$Pfa = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 L + \varepsilon \quad (6)$$

$$Pfd = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 L + \varepsilon \quad (7)$$

$$CPha = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 v^2 + \varepsilon \quad (8)$$

$$CPhd = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 v^2 + \varepsilon \quad (9)$$

$$CPfa = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 L + \varepsilon \quad (10)$$

$$CPfd = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 L + \varepsilon \quad (11)$$

em que

P_c = produtividade média de colheita, em $m^3 h^{-1}$;

C_c = custo de colheita, em $R\$ m^{-3}$

Ph_a = produtividade do *harvester* em aclave ($m^3 h^{-1}$);

Ph_d = produtividade do *harvester* em declive ($m^3 h^{-1}$);

Pf_a = produtividade do *forwarder* em aclave ($m^3 h^{-1}$);

Pf_d = produtividade do *forwarder* em declive ($m^3 h^{-1}$);

CPh_a = custo de produção do *harvester* em aclave ($R\$ m^{-3}$);

CPh_d = custo de produção do *harvester* em declive ($R\$ m^{-3}$);

CPf_a = custo de produção do *forwarder* em aclave ($R\$ m^{-3}$);

CPf_d = custo de produção do *forwarder* em declive ($R\$ m^{-3}$);

d = inclinação do terreno ($^\circ$) na unidade de manejo;

v = volume individual (VMI), em $m^3 \text{ árvore}^{-1}$;

L = distância de extração, em metros;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3 \text{ e } \beta_4$ = parâmetros estimados; e

\mathcal{E} = erro aleatório, $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

O *harvester* executa a operação de corte, que consiste na derrubada e no direcionamento de queda da árvore, processamento de galhada, descascamento, traçamento e posicionamento das toras em feixes a serem extraídos pelo *forwarder*. A produtividade e o custo dessa operação foram estimados, em função da inclinação do terreno e do volume individual por árvore.

O *forwarder* executa a operação de extração, que consiste no deslocamento e empilhamento dos feixes de toras distribuídos na unidade de manejo até a beira da estrada. A produtividade e o custo dessa operação foram estimados em função da declividade do terreno e da distância percorrida pela máquina.

Na sequência, é feito o transporte da madeira, carregamento, deslocamento e descarregamento das pilhas de madeira na beira da estrada até o pátio de estocagem. O custo de transporte foi estimado a partir de um modelo de regressão ajustado, que considera o tempo de carregamento, deslocamento e descarregamento para diferentes distâncias (equações 12 e 13). O modelo utilizado foi:

$$Rmk = \beta_0 (\beta_1 - e^{-\beta_2 d}) + \varepsilon \quad (12)$$

$$Rm = Rmk.d.(1,2) \quad (13)$$

em que

Rmk = custo de transporte da madeira posto fábrica, em R\$.m⁻³.km⁻¹;

d = distância a de deslocamento da madeira, em quilômetros;

Rm = custo de transporte da madeira posto fábrica, em R\$.m⁻³;

$\beta_0, \beta_1 e \beta_2$ = parâmetros a serem estimados; e

ε = erro aleatório, $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

4.2 Autômato Celular Proposto

O Sistema denominado HSS (*Harvest Scheduling System*) desenvolvido, aplica critérios e regras de autômatos celulares com objetivo de otimizar o agendamento da colheita. A programação foi realizada em linguagem Java, ambiente de desenvolvimento IDE (*Integrated Development Environment*) Netbeans 8.2, e a JDK 8 (*Java Development Kit*). A configuração do computador utilizado possui ambiente Windows, processador Intel(R) Core^(TM) i7-3632 CPU @ 2.20 GHz, 6,00 GB de memória RAM instalada, sistema operacional de 64 bits e processador com base em x64.

A função objetivo foi definida para maximizar o lucro de uma floresta contendo 100 unidades de manejo a um horizonte de planejamento de 365 dias, conforme descrita abaixo:

$$\max Z = \sum_{i=1}^{I=100} \sum_{t=1}^{T=365} L_{i,t} E_{i,t}$$

em que

$L_{i,t}$ = lucro da i -ésima unidade de manejo obtido pelo estoque de madeira colhido no tempo t ;

$E_{i,t}$ = estado da i -ésima unidade de manejo no tempo t , que assume valor 1 caso o talhão esteja sendo colhido e 0 caso contrário;

I = número total de unidades de manejo; e

T = número total de dias do horizonte de planejamento.

O Valor Presente Líquido (VPL) foi calculado a partir da diferença entre as receitas e os custos, corrigidos para o ano de início da rotação a uma taxa de desconto de 10% ao ano. Na formulação matemática aplicada aos ACs, o VPL é calculado por unidade de área (hectare), por meio da expressão:

$$VPL = \sum_{t=0}^n R_t(1 - i)^{-t} - \sum_{t=0}^n C_t(1 - i)^{-t}$$

em que

C_t = soma de todos os custos no tempo t por unidade de área;

R_t = receitas no tempo t por unidade de área;

i = taxa de desconto;

n = duração do projeto, em anos; e

t = idade da unidade de manejo no tempo t , em anos.

Logo abaixo são definidos alguns conceitos fundamentais para facilitar o entendimento da modelagem proposta.

Autômato celular (singular) é a unidade de manejo florestal (UM) e autômatos celulares (plural) é o conjunto das UM do povoamento que está sendo analisado.

Perturbação – sinal que um autômato recebe indicando início ou término da colheita.

Evolução – ocorre quando um autômato muda de um estado para o outro entre os tempos $t - 1$ (inicial) e t (futuro). Se uma unidade de manejo (autômato) finaliza sua colheita no tempo inicial, ele sofrerá uma perturbação e irá evoluir para reforma ou condução da brotação no tempo futuro. Uma unidade de manejo que se encontra no estado ‘em crescimento’, mas foi sorteada para ser colhida no tempo inicial, sofrerá uma perturbação e irá evoluir para o estado ‘em colheita’ no tempo futuro.

Geração – análise de perturbação e evolução para todos as unidades de manejo em um único período $t =$ um dia. Cabe comentar que a modelagem proposta possibilita modificar o tempo t para que cada geração ocorra em horas, minutos ou até mesmo segundos, permitindo tomar decisões automatizadas operacionalmente em tempo real.

Nesse trabalho, as células (autômatos) se encontram espacialmente distribuídas na forma de uma matriz bidimensional e são analisadas da esquerda para a direita e de cima para baixo. Dado que a floresta possui 100 unidades de manejo, essa é a quantidade de evoluções que são testadas a cada geração, lembrando que cada uma delas pode ou não evoluir. Uma nova geração surge ao realizar a análise do estado de cada autômato i entre os tempos $t - 1$ (inicial) e t (futuro).

Uma iteração é finalizada e outra é iniciada quando não existe mais a possibilidade de as unidades de manejo serem colhidas ou quando o período de planejamento é atingido.

Quando uma evolução sofre uma perturbação, ocorre a mutação de duas unidades de manejo para a mesma passagem de tempo $t - 1$ e t . Quando não ocorre perturbação a evolução nunca sofre mutação. Assim, somente uma perturbação é capaz de realizar mudança do estado $E_{i,t-1}$ para $E_{i,t}$. Essa mudança de estado entre os tempos $t - 1$ e t caracteriza uma mutação.

A restrição da idade técnica de corte é analisada quando ocorre mutação e impede que ela ocorra se a idade associada ao autômato é menor do que a idade mínima definida pelo usuário. De certa forma, as restrições também foram caracterizadas como uma perturbação.

A passagem do tempo $t - 1$ para t possui escala temporal de um (1) dia. A perturbação acontece quando o tempo $t - 1$ possuía valor igual ao dia calculado para finalizar a colheita da unidade de manejo i . Quando isto ocorria, a primeira mutação ocorreu na unidade de manejo que acionou a perturbação ($UM i = p$), mudando seu estado $E_{i=p,t-1} = 1$ para $E_{i=p,t} = 0$. A segunda mutação dessa evolução ocorreu na $UM i \neq p$ mudando seu estado $E_{i \neq p,t-1} = 0$ para $E_{i \neq p,t} = 1$, que, por sua vez, é selecionada de acordo com os critérios de vizinhança e/ou sorteio.

Sempre que ocorre a mudança do estado $E_{i=p,t-1} = 1$ para $E_{i=p,t} = 0$ o sistema atualiza a tabela de produção, realiza cálculos e armazena as seguintes informações: número da UM $i = p$ e suas características; distância e custo de deslocamento da colheita entre $UM i = p$ e $UM i \neq p$; tempo t , em dias; estoque colhido, custos de formação, colheita e transporte posto fábrica; receita e valor presente líquido.

Quando uma UM termina a colheita o algoritmo sorteia o próximo autômato que será colhido. Somente os autômatos vizinhos (elegíveis por um critério de distância máxima e quantidade) podem ser sorteados. Dois critérios foram utilizados para sorteio, sendo um inteiramente casualizado e outro pelo método da roleta viciada.

O critério para determinar a vizinhança entre os autômatos adotado foi a distância (km) entre as unidades de manejo. A obtenção da matriz de distâncias considera o ponto central de

cada autômato e contém a combinação da distância entre todos eles. Por isso, cada autômato também pode ser considerado um ‘nó’ no conceito de grafos, pois ele armazena todas as informações de cada unidade de manejo, mas por sofrer restrições com regras de vizinhança, também possui características de autômatos celulares.

Uma geração é finalizada e outra é iniciada quando não existe mais a possibilidade das unidades de manejo serem colhidas ou quando o período de planejamento é atingido.

Cada iteração gera uma sequência cronológica de colheita para as UM, também conhecida como agendamento da colheita.

4.3 Cenários Analisados

Trinta (30) cenários foram processados, sendo seis (6) estratégias de modelagem aplicadas a cinco (5) custos distintos de deslocamento para as máquinas de colheita florestal. Cada cenário foi calculado a partir de 1.000 (mil) iterações.

A quantidade de frentes de colheita e as unidades de manejo que serão colhidas no estado inicial é definido *a priori* na base de dados a ser importada para o sistema. O usuário pode variar a quantidade e o estado inicial para investigar a influência do estado inicial para cada cenário.

Cada estratégia de modelagem contém diferentes regras de vizinhança e sorteio dos autômatos elegíveis a mudança de estado. Assim, quando uma unidade de manejo finaliza a colheita, a unidade que será colhida é selecionada por uma das alternativas abaixo:

- 1) Seleciona quatro vizinhos mais próximos que não apresentam restrição de corte e sorteia um de forma inteiramente casualizada para iniciar a colheita;
- 2) Seleciona quatro vizinhos mais próximos que não apresentam restrição de corte e sorteia uma UM a ser colhida pelo método da roleta viciada, utilizando o VPL como variável da probabilidade de escolha;
- 3) Seleciona oito vizinhos mais próximos que não apresentam restrição de corte e sorteia um de forma inteiramente casualizada para iniciar a colheita;
- 4) Seleciona oito vizinhos mais próximos que não apresentam restrição de corte e sorteia uma UM a ser colhida pelo método da roleta viciada, utilizando o VPL como variável da probabilidade de escolha;
- 5) Sorteia de forma inteiramente casualizada uma UM do povoamento florestal a ser colhida sem qualquer restrição de vizinhança; e

- 6) Sorteia uma UM do povoamento florestal a ser colhida pelo método da roleta viciada, utilizando o VPL como variável da probabilidade de escolha, sem qualquer restrição de vizinhança;

Os resultados foram analisados em termos de VPL global. A lista dos cenários gerados para análise é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Lista dos cenários utilizados como estudos de caso.

Cenário	Critério de Vizinhança	Sorteio	Custo de deslocamento (R\$/km)
1	4	Aleatório	0
2	4	Aleatório	500
3	4	Aleatório	1.000
4	4	Aleatório	2.500
5	4	Aleatório	5.000
6	4	Roleta Viciada	0
7	4	Roleta Viciada	500
8	4	Roleta Viciada	1.000
9	4	Roleta Viciada	2.500
10	4	Roleta Viciada	5.000
11	8	Aleatório	0
12	8	Aleatório	500
13	8	Aleatório	1.000
14	8	Aleatório	2.500
15	8	Aleatório	5.000
16	8	Roleta Viciada	0
17	8	Roleta Viciada	500
18	8	Roleta Viciada	1.000
19	8	Roleta Viciada	2.500
20	8	Roleta Viciada	5.000
21	Todos	Aleatório	0
22	Todos	Aleatório	500
23	Todos	Aleatório	1.000
24	Todos	Aleatório	2.500
25	Todos	Aleatório	5.000
26	Todos	Roleta Viciada	0
27	Todos	Roleta Viciada	500
24	Todos	Roleta Viciada	1.000
29	Todos	Roleta Viciada	2.500
30	Todos	Roleta Viciada	5.000

Fonte: dados da pesquisa.

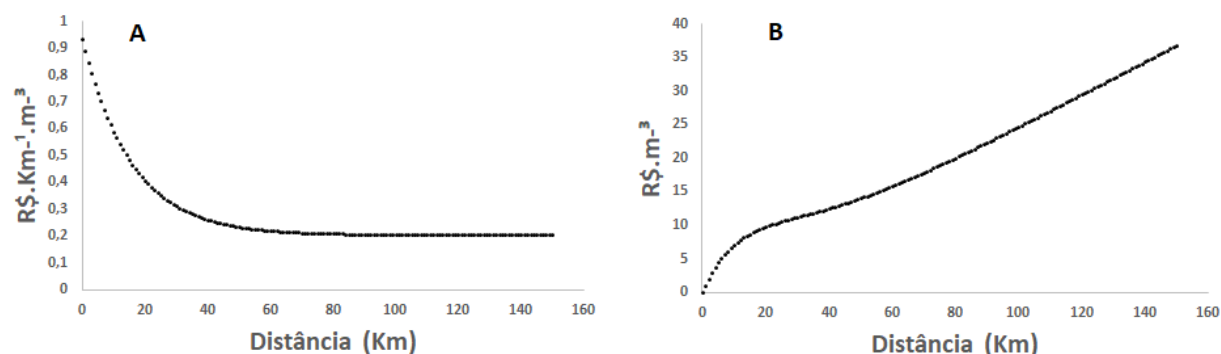
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 *Harvest Scheduling System*

O sistema computacional, denominado por *Harvest Scheduling System* (HSS), foi desenvolvido buscando obter uma interface mais amigável possível para o usuário, admitindo flexibilidade na simulação de cenários.

A tendência do comportamento do custo em relação à distância de transporte da madeira posto fábrica é apresentada na Figura 3. Nessa figura, o gráfico “A” mostra que o custo de transporte ($\text{R\$ m}^{-3} \text{ km}^{-1}$) diminui quando aumenta a distância. No entanto, tende a ficar constante após 90 km, em virtude da relação entre o tempo de deslocamento e o tempo de carregamento/descarregamento.

Figura 3 – Comportamento do custo de transporte. Os gráficos “A” e “B” equivalem as equações 14 e 15, respectivamente.

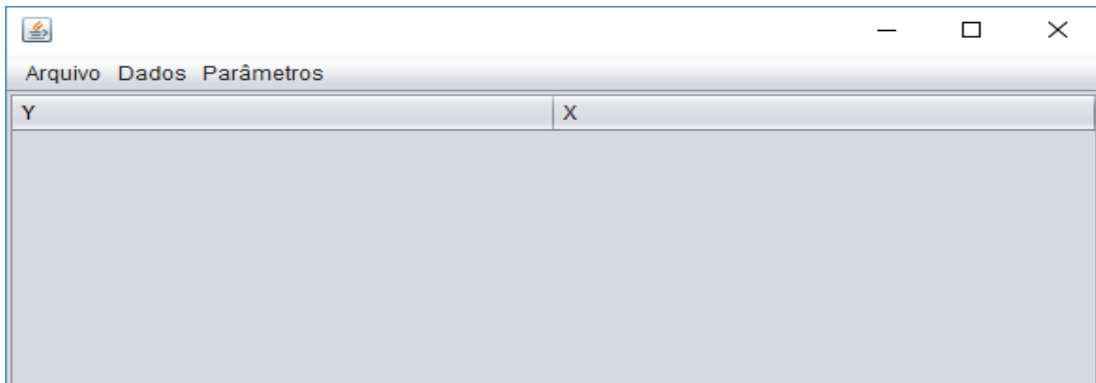


Fonte: dados da pesquisa.

A tela inicial do HSS é apresentada na Figura 4. O menu Dados permite importar as informações cadastrais da floresta, a matriz de distância entre as unidades de manejo e as curvas de produção (Figura 5).

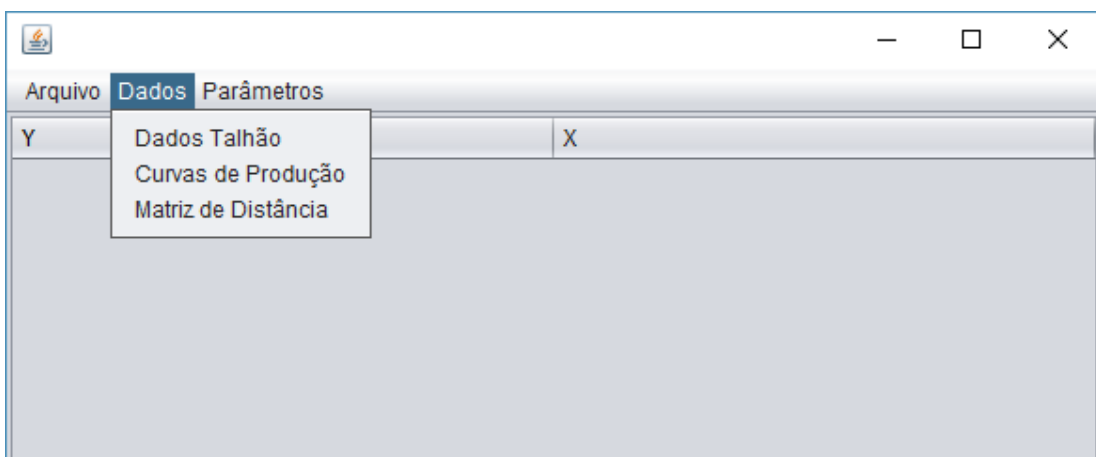
Ao clicar em “Dados do Talhão” (unidade de manejo) da Figura 5 é aberta a tela de importação dos dados na extensão *.xlsx* ou *.txt* (Figura 6). Ao clicar em Importar Excel (Figura 6) a tela de seleção para o caminho do arquivo a ser importado é aberta (Figura 7). Uma nova tela se abre para selecionar a planilha do arquivo a ser importado (Figura 8). Então, o sistema abre outra tela para confirmar a importação (Figura 9). O mesmo procedimento utilizado para importar os “Dados do Talhão” deve ser repetido para os arquivos que contêm a “Matriz de Distância” e “Curvas de Produção” (Figuras 10 e 11).

Figura 4 – Tela inicial do sistema de agendamento da colheita.



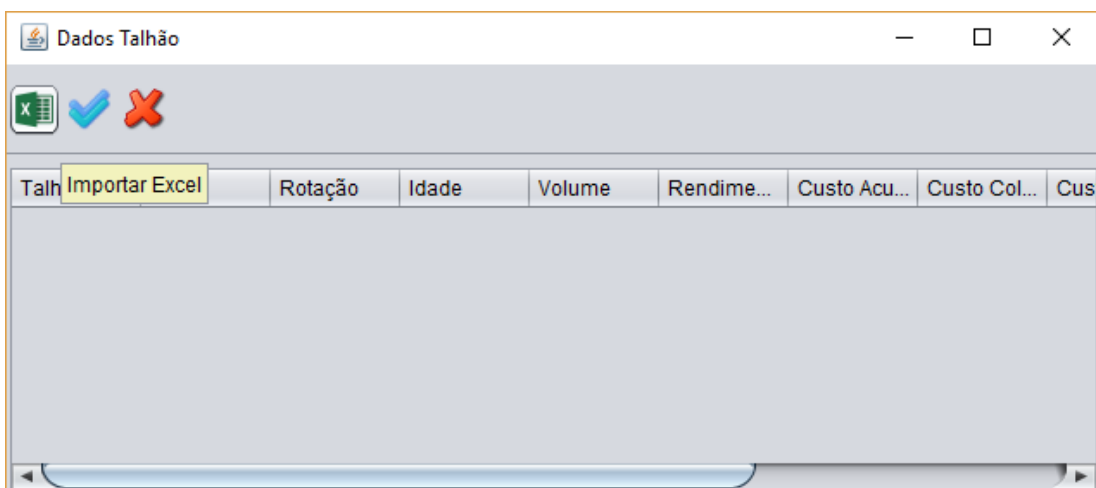
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5 – Menu de seleção dos dados a serem importados.



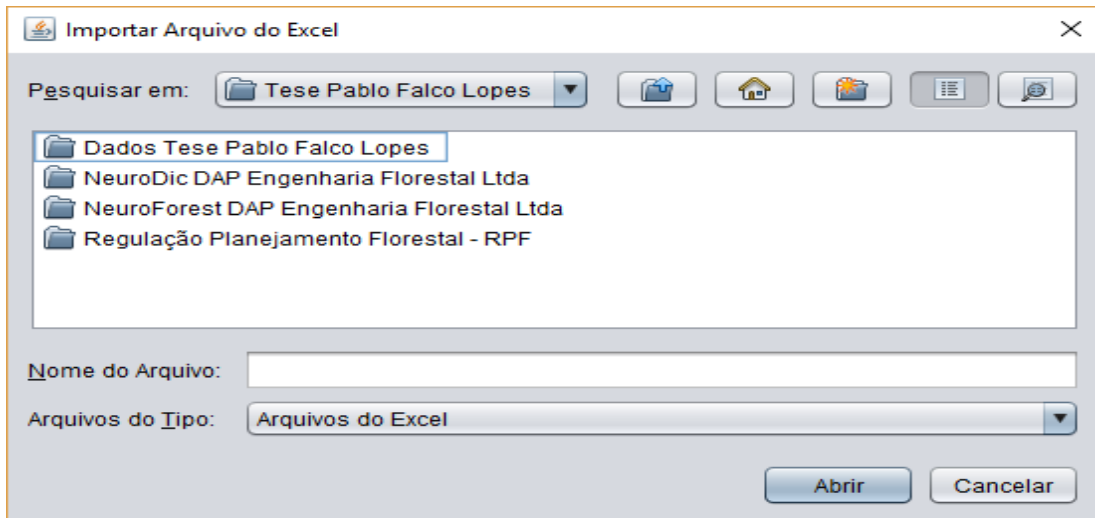
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 6 – Tela inicial para importação de dados das unidades de manejo.



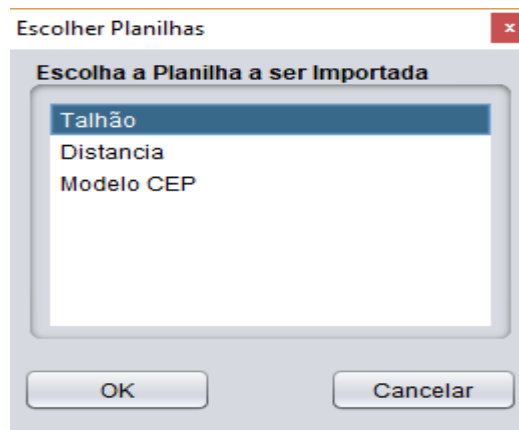
Fonte: dados da pesquisa.

Figura 7 – Tela para indicar o caminho do arquivo a ser importado.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 8 – Tela de seleção da planilha.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 9 – Tela de confirmação da importação da base floresta.

Talhão	Área	Rotação	Idade	Distancia	Rendime...	Custo Acu...	Custo Col...	Custo Ma...	X	Y	Em Corte
1	17.39999...	1	5.21	100	29.52101...	3746.983...	24.70620...	200	1	1	F
2	36.42	1	5.24	100.5	27.20608...	3746.983...	26.06377...	200	2	1	F
3	62	1	5.19	101	27.82193...	3746.983...	25.25128...	200	3	1	F
4	33.44	1	5.18	101.5	28.34752...	3746.983...	25.23638...	200	4	1	F
5	34.46	1	5.18	102	27.87164...	3746.983...	25.57646...	200	5	1	F
6	58.74	2	5.56	102.5	30.99125...	1786.104...	20.71040...	200	6	1	F
7	10.44	2	5.56	103	33.12284...	1786.104...	19.89373...	200	7	1	F
8	15.24	2	5.56	103.5	34.30822...	1786.104...	19.25159...	200	8	1	F

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 10 – Tela de confirmação da importação da matriz de distância.

The screenshot shows a window titled 'Importar Dados' with a sub-section 'Verificar Dados'. It contains a table with three columns: 'Origem', 'Destino', and 'Distância (km)'. The data represents distances between 20 different locations (origens and destinos).

Origem	Destino	Distância (km)
1	1	0
1	2	0.31841907788...
1	3	0.88103761078...
1	4	1.37990547130...
1	5	1.88657345228...
1	6	2.47685195591...
1	7	2.99684384215...
1	8	3.41367126900...
1	9	3.96809408822...
1	10	4.41677539560...
1	11	0.44469342937...
1	12	0.52846237693...
1	13	1.10124491316...
1	14	1.38901644964...
1	15	2.06045425806...
1	16	2.50993132755...
1	17	3.00978589719...
1	18	3.48081130844...
1	19	3.92021504399...
1	20	4.41497397968...

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 11 – Tela de confirmação da importação das curvas de produção.

The screenshot shows a window titled 'Importar Dados' with a sub-section 'Verificar Dados'. It contains a table with five columns: 'Talhão', 'Modelo', 'a', 'b', and 'c'. The data lists production parameters for 20 different plots (talhões).

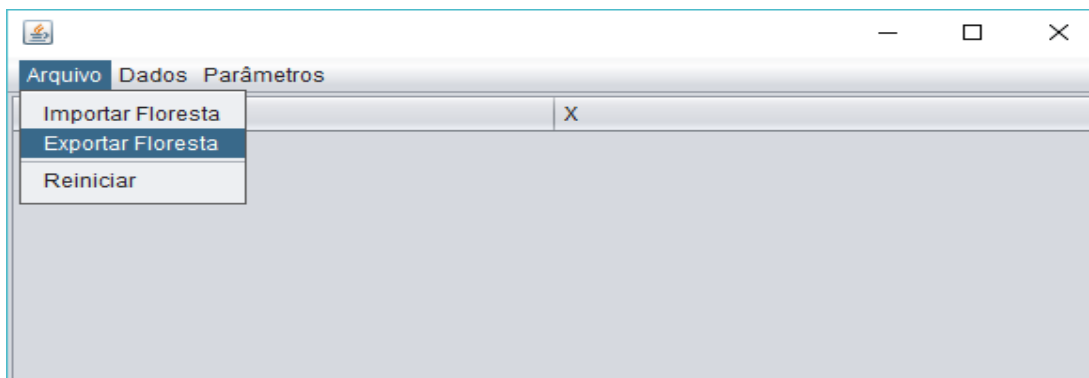
Talhão	Modelo	a	b	c
1	Gompertz	603.9182...	1.224761...	2.205444...
2	Gompertz	506.2820...	1.224761...	2.205444...
3	Gompertz	510.5913...	1.224761...	2.205444...
4	Gompertz	558.9147...	1.224761...	2.205444...
5	Gompertz	462.4960...	1.224761...	2.205444...
6	Gompertz	567.3039...	1.224761...	2.205444...
7	Gompertz	575.4928...	1.224761...	2.205444...
8	Gompertz	536.5355...	1.224761...	2.205444...
9	Gompertz	471.3520...	1.224761...	2.205444...
10	Gompertz	470.0200...	1.224761...	2.205444...
11	Gompertz	492.8397...	1.224761...	2.205444...
12	Gompertz	513.8469...	1.224761...	2.205444...
13	Gompertz	649.9133...	1.224761...	2.205444...
14	Gompertz	615.8892...	1.224761...	2.205444...
15	Gompertz	641.6007...	1.224761...	2.205444...
16	Gompertz	683.4245...	1.224761...	2.205444...
17	Gompertz	505.7648...	1.224761...	2.205444...
18	Gompertz	537.6480...	1.224761...	2.205444...
19	Gompertz	537.6480...	1.224761...	2.205444...
20	Gompertz	346.0256...	1.224761...	2.205444...

Fonte: dados da pesquisa.

Quando todos os arquivos são importados para o HSS, a base de dados pode ser exportada de forma unificada, buscando agilizar a necessidade de futuras importações dos dados para uma mesma base florestal ao clicar no menu “Arquivo” e posteriormente em “Exportar Floresta” (Figura 12). A Figura 13 contém a tela de seleção do caminho para salvar a base florestal unificada. Outra funcionalidade implementada é a alternativa de clicar em Reiniciar, que substitui a base de dados de um cenário que foi gerado pela base de dados

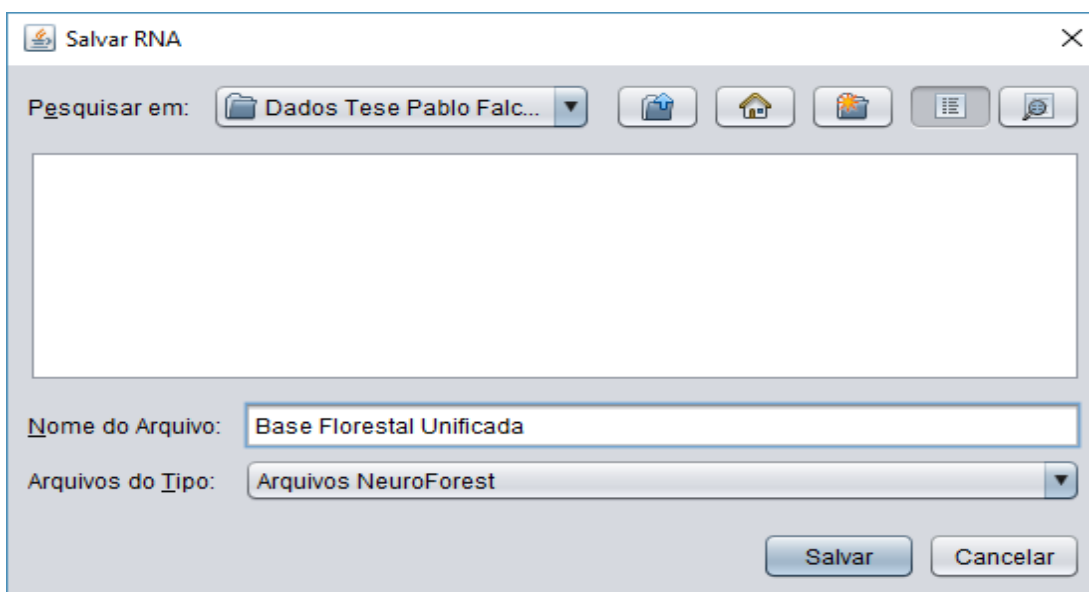
original, permitindo que o usuário rode um novo cenário sem a necessidade de importar novamente a base de dados (Figura 12).

Figura 12 – Tela de exportação da base florestal unificada.



Fonte: dados da pesquisa.

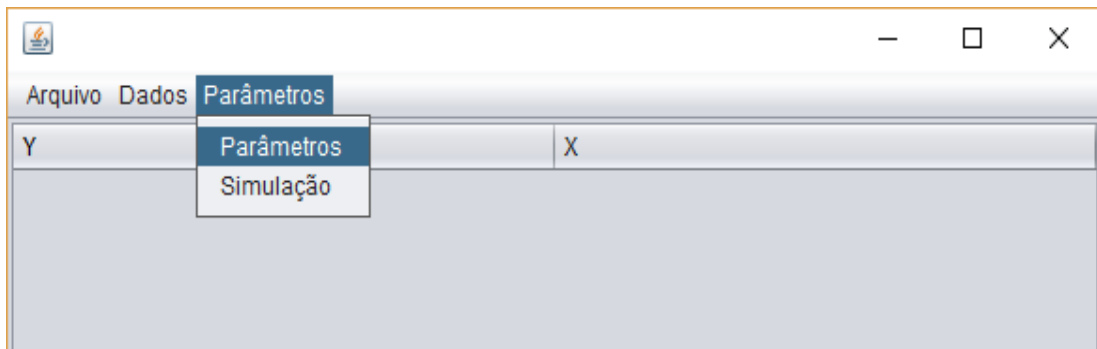
Figura 13 – Tela de seleção do caminho para salvar a base florestal unificada.



Fonte: dados da pesquisa.

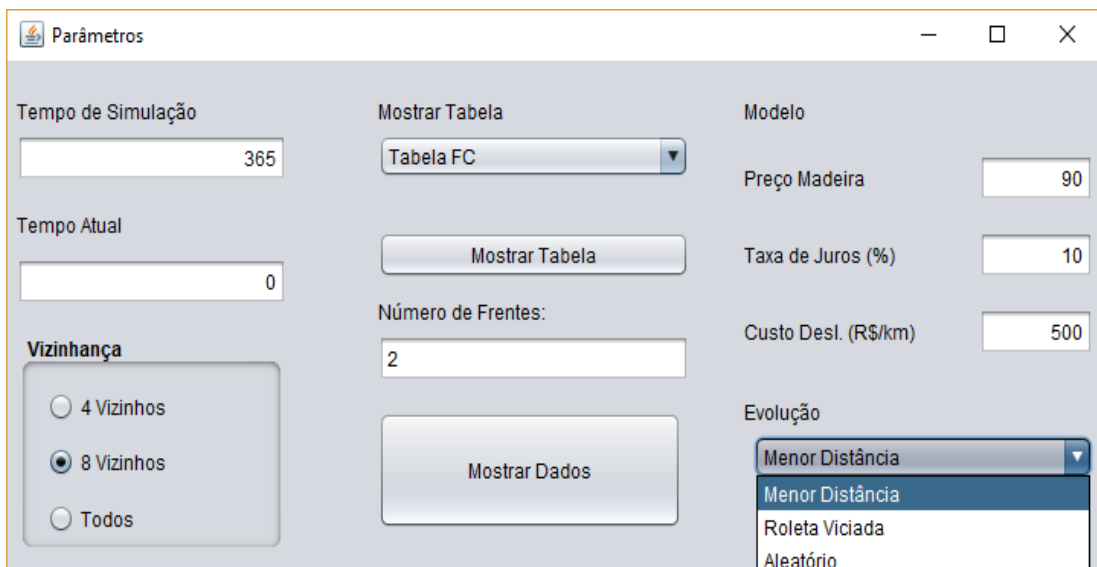
A tela de configuração dos Parâmetros é acessada conforme apresentado na Figura 14. A Figura 15 mostra a tela de configuração dos parâmetros que possibilita definir o horizonte de planejamento desejado (dias), o critério de vizinhança, o critério de sorteio dos vizinhos elegíveis, que mudarão do estado 0 para o estado 1, o preço da madeira (R\$/m³), a taxa de juros (%) e o custo de deslocamento das máquinas de colheita entre as unidades de manejo. Essa tela também é utilizada para selecionar as tabelas de cada geração que o usuário deseja visualizar conforme listado na Figura 16.

Figura 14 – Tela do caminho para configurar os cenários.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 15 – Configuração dos parâmetros.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 16 – Definição das variáveis da base florestal a ser apresentada.



Fonte: dados da pesquisa.

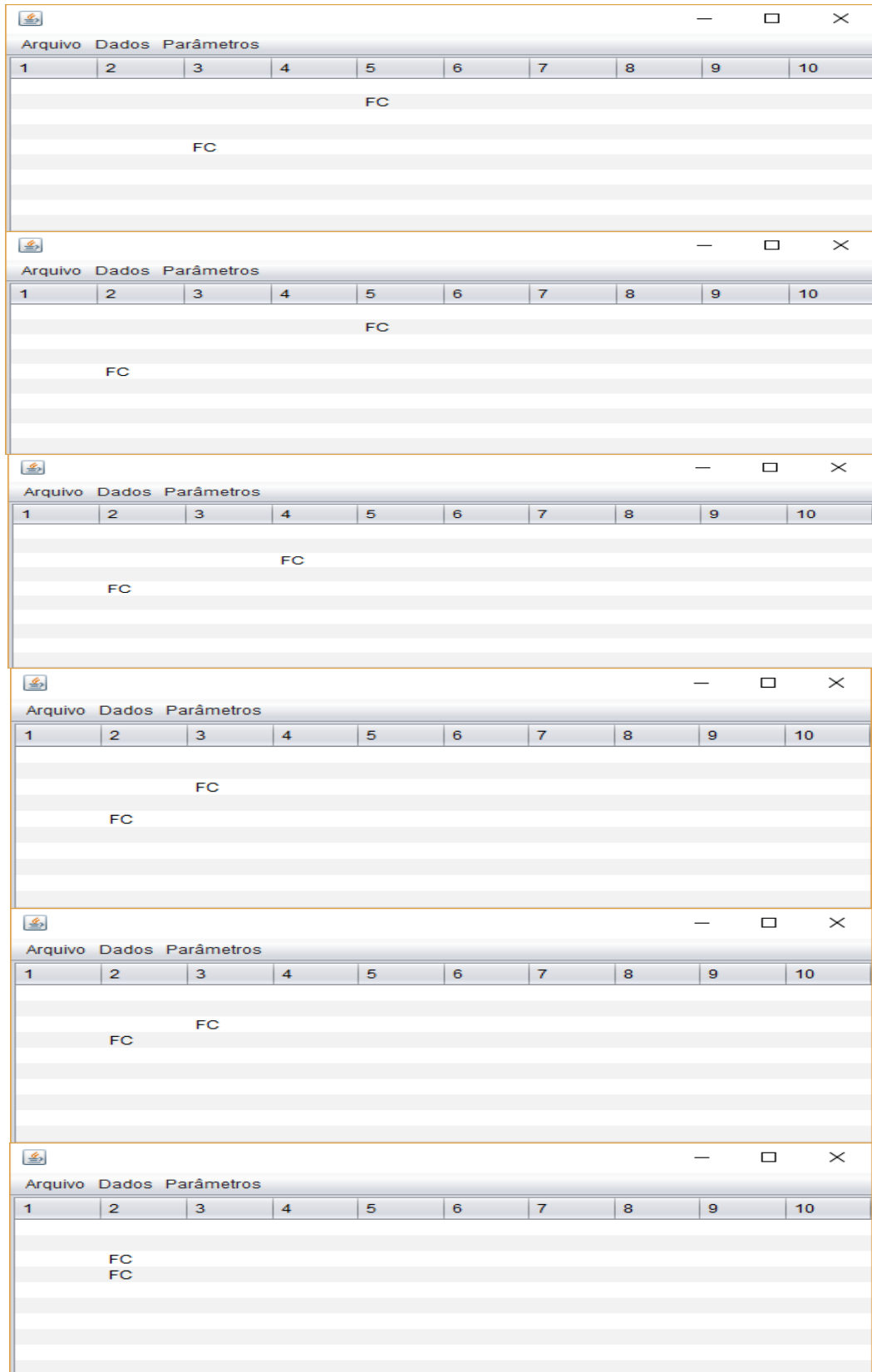
Seis gerações que sofreram mutação em suas evoluções são apresentadas de forma sequencial na Figura 17. Essa simulação foi gerada com a regra de quatro vizinhos mais próximos, com custo para deslocamento das máquinas de colheita de R\$/km 500,00, e roleta viciada, utilizando o VPL como taxa de probabilidade no sorteio da unidade de manejo. Os resultados do agendamento da colheita com duas frentes de máquinas para uma iteração completa são apresentados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6.

A Tabela 7 lista as melhores soluções dentre as 1.000 iterações de cada cenário em ordem decrescente (da melhor para a pior solução). Nessa planilha, a roleta viciada foi o critério de sorteio que apresentou o melhor resultado para todas as faixas de custo de deslocamento das máquinas entre as unidades de manejo. A regra de vizinhança com oito vizinhos apresentou os melhores resultados para os custos de deslocamento da colheita de R\$/km 1.000, 2.500 e 5.000. Os cenários com custo de deslocamento iguais a 0 e 500 R\$/km demonstram que o critério sem a regra de vizinhança apresentou os melhores resultados.

Ao analisar os cenários da Tabela 7, observa-se que o raciocínio lógico do ser humano em optar pelo vizinho mais próximo não é a melhor solução.

Outra observação interessante é o fato de que oito vizinhos apresentaram solução melhor do que quatro vizinhos, o que pode ser explicado pela escolha de colher talhões com taxas de crescimento em estagnação antes dos que ainda possuem taxas de crescimento acelerada.

Figura 17 – Telas do sistema de agendamento da colheita para seis gerações que sofreram mutação.



Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 3 – Resultado do agendamento da colheita por unidade de manejo para a frente de colheita “A”. Dia de início da colheita, Total de dias gasto para colher, variáveis e características do povoamento, Distância de transporte e Distância de deslocamento da frente de colheita.

Talhão	Dia de Início da Colheita	Tempo de Colheita (Dias)	Idade (Anos)	Área (ha)	Rotação	Volume (m³/ha)	Distância de Transporte (km)	Distância Frente de Colheita (km)
15	1	13	5,0	69,0	1	261,1	102,1	0,00
24	14	16	7,4	77,3	1	245,1	101,8	0,53
23	30	10	7,6	49,3	1	246,5	101,4	0,40
22	41	12	7,5	54,2	1	294,9	101,1	0,33
33	54	7	22,9	44,7	1	256,7	101,8	0,65
34	61	21	22,9	54,7	1	631,6	102,1	0,45
25	82	16	7,6	77,3	1	250,9	102,2	0,59
26	99	7	7,8	44,3	1	184,7	102,7	0,43
36	106	9	23,0	33,0	1	491,4	102,9	0,34
38	115	24	23,1	69,4	1	577,9	103,8	0,84
20	139	21	7,8	110,2	1	225,8	104,5	1,22
9	161	8	6,0	50,7	2	235,3	104,0	0,52
6	170	11	6,0	58,7	2	284,5	102,5	1,44
10	182	5	6,1	31,8	2	237,2	104,5	1,98
12	188	7	6,1	40,2	2	260,1	100,7	3,91
13	195	7	6,1	33,1	2	330,1	101,1	0,49
8	202	3	6,1	15,2	2	273,4	103,5	2,52
11	205	4	6,1	21,5	2	251,5	100,5	3,39
7	210	2	6,1	10,4	2	294,5	103,0	2,98
52	212	15	6,0	69,7	1	314,7	152,5	53,37
62	227	16	21,3	60,2	1	438,8	153,0	0,33
63	243	10	21,5	30,1	1	489,4	153,2	0,35
54	253	14	6,1	66,9	1	280,6	152,9	0,60
56	268	12	6,1	49,0	1	371,0	153,5	0,93
59	280	14	6,1	55,2	1	392,7	154,7	1,41
82	294	18	27,0	65,7	2	467,4	154,0	3,78
51	312	15	6,3	77,4	1	264,7	152,5	1,45
93	328	12	6,0	62,9	1	293,6	154,6	2,10
95	341	13	6,1	65,2	1	303,3	154,9	0,89
96	354	5	6,1	39,8	1	168,8	155,1	0,37
97	359	6	6,1	50,7	1	167,2	155,4	0,42
87	365	5	6,2	38,3	1	168,0	155,0	0,40

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 4 – Resultado do agendamento da colheita por unidade de manejo para a frente de colheita “B”, dia de início da colheita, total de dias gasto para colher, variáveis e características do povoamento, distância de transporte e distância de deslocamento da frente de colheita.

Talhão	Dia de Início da Colheita	Tempo de Colheita (Dias)	Idade (Anos)	Área (ha)	Rotação	Volume (m ³ /ha)	Distância de Transporte (Km)	Distância Frente de Colheita (Km)
43	1	7	7,2	31,0	1	281,8	102,2	0,00
42	8	25	7,3	103,3	1	307,4	102,1	0,48
32	34	7	22,8	44,7	1	256,6	101,6	0,40
31	42	6	22,9	27,9	1	338,5	101,5	0,35
41	49	2	7,3	8,1	1	301,7	102,0	0,34
21	51	21	7,5	99,8	1	245,8	101,0	0,81
44	73	11	7,4	52,6	1	260,4	102,5	1,71
45	84	11	7,5	52,6	1	261,3	102,8	0,32
35	95	16	23,0	39,0	1	654,2	102,5	0,33
37	112	17	23,1	33,0	1	805,1	103,4	0,92
39	129	4	23,1	36,1	1	193,3	104,3	0,85
40	133	16	23,1	51,1	1	448,8	104,7	0,49
79	149	40	30,2	170,8	1	371,9	155,3	51,93
65	189	16	21,3	43,1	1	580,2	153,6	1,94
64	206	11	21,3	38,7	1	510,3	153,4	0,34
55	218	15	6,0	59,7	1	384,6	153,2	0,54
53	234	17	6,1	81,8	1	294,4	152,7	0,94
72	252	7	6,3	30,1	1	340,0	153,5	0,97
71	259	11	6,4	58,4	1	263,0	153,5	0,32
61	271	4	6,1	21,4	1	265,4	153,0	0,36
58	276	3	6,0	11,5	1	398,9	154,3	3,35
60	280	8	6,0	31,0	1	398,3	155,1	0,95
57	288	15	6,1	59,5	1	394,6	153,9	1,37
47	304	18	6,3	79,9	1	334,2	103,6	50,49
46	323	23	6,2	106,9	1	296,0	103,2	0,37
49	347	9	6,3	44,6	1	327,8	104,5	1,48
5	356	6	6,2	34,5	1	237,7	102,0	2,64
14	363	18	6,1	89,7	1	310,4	101,6	0,52

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 5 – Resultado financeiro do agendamento da colheita por unidade de manejo para a frente de colheita “A”.

Talhão	Custo de Formação (R\$/m³)	Custo de Colheita (R\$/m³)	Custo de Transporte (R\$/m³)	Receita (R\$/m³)	VPL sem Deslocamento (R\$/m³)	VPL com Deslocamento (R\$/m³)
15	12,92	12,93	15,59	55,72	14,28	14,28
24	16,02	13,17	12,44	44,56	2,93	2,92
23	15,42	12,23	12,12	43,57	3,80	3,80
22	13,32	12,27	12,24	44,11	6,30	6,29
33	17,03	1,66	2,83	10,15	-11,38	-11,38
34	6,92	2,84	2,84	10,13	-2,46	-2,46
25	15,65	12,93	12,27	43,76	2,92	2,91
26	21,74	12,90	12,02	42,70	-3,95	-3,97
36	8,89	2,32	2,82	10,01	-4,03	-4,03
38	7,56	2,47	2,84	9,99	-2,89	-2,89
20	17,39	12,82	12,21	42,62	0,19	0,18
9	7,59	11,71	14,47	50,78	17,01	17,00
6	6,28	11,66	14,24	50,66	18,49	18,46
10	7,53	11,88	14,46	50,50	16,63	16,56
12	6,87	12,53	13,93	50,42	17,09	16,99
13	5,41	11,68	13,96	50,33	19,28	19,27
8	6,53	10,75	14,25	50,23	18,71	18,54
11	7,10	11,63	13,84	50,19	17,62	17,45
7	6,07	11,08	14,15	50,13	18,83	18,56
52	11,91	14,20	21,09	50,68	3,48	2,79
62	9,61	2,03	4,92	11,79	-4,77	-4,77
63	8,62	4,28	4,87	11,65	-6,11	-6,12
54	13,35	14,70	20,96	50,23	1,22	1,21
56	10,10	13,70	21,12	50,41	5,49	5,48
59	9,54	13,74	21,23	50,30	5,78	5,76
82	6,37	1,91	2,88	6,84	-4,32	-4,32
51	14,16	14,59	20,52	49,31	0,04	0,02
93	12,76	14,19	21,35	50,62	2,32	2,28
95	12,35	14,32	21,34	50,49	2,48	2,47
96	22,19	15,64	21,32	50,37	-8,79	-8,81
97	22,41	15,94	21,35	50,35	-9,36	-9,37
87	22,30	15,54	21,14	49,98	-9,00	-9,02

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 6 – Resultado financeiro do agendamento da colheita por unidade de manejo para a frente de colheita “B”.

Talhão	Custo de Formação (R\$/m³)	Custo de Colheita (R\$/m³)	Custo de Transporte (R\$/m³)	Receita (R\$/m³)	VPL sem Deslocamento (R\$/m³)	VPL com Deslocamento (R\$/m³)
43	13,94	12,48	12,67	45,18	6,10	6,10
42	12,78	12,84	12,61	45,06	6,84	6,83
32	17,03	1,67	2,84	10,20	-11,34	-11,35
31	12,91	1,62	2,83	10,18	-7,18	-7,18
41	13,02	11,99	12,50	44,70	7,19	7,15
21	15,97	13,05	12,15	43,87	2,70	2,69
44	15,08	12,47	12,43	44,25	4,26	4,23
45	15,03	12,43	12,44	44,12	4,22	4,22
35	6,68	3,45	2,82	10,04	-2,91	-2,91
37	5,43	3,38	2,83	10,00	-1,64	-1,65
39	22,62	1,60	2,84	9,95	-17,11	-17,12
40	9,74	3,71	2,85	9,94	-6,36	-6,36
79	11,45	1,32	2,15	5,06	-9,86	-9,88
65	7,27	3,77	4,95	11,82	-4,18	-4,18
64	8,26	2,71	4,92	11,76	-4,14	-4,14
55	9,74	13,97	21,21	50,74	5,82	5,81
53	12,73	14,47	21,01	50,43	2,23	2,21
72	11,29	13,65	20,67	49,34	3,73	3,70
71	14,59	13,92	20,57	49,11	0,03	0,02
61	14,12	13,58	20,91	50,08	1,48	1,46
58	9,39	13,21	21,32	50,64	6,72	6,51
60	9,41	13,48	21,41	50,59	6,28	6,26
57	9,50	13,74	21,04	50,10	5,83	5,81
47	11,21	14,04	14,07	49,55	10,23	9,71
46	12,66	14,91	14,15	50,01	8,30	8,30
49	11,43	13,62	14,08	49,18	10,05	10,02
5	15,76	14,21	13,99	50,01	6,05	5,96
14	12,07	14,40	14,08	50,53	9,99	9,98

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 7 – Resultados das melhores soluções geradas para cada grupo de cenários em ordem decrescente de valor presente líquido para cada custo de deslocamento.

Vizinhança	Evolução	Custo de Deslocamento (R\$/m³)	Área (ha)	Distância deslocada pelas máquinas (Km)	Volume Colhido (m³)	Custo de Formação (R\$/m³)	Custo de Colheita (R\$/m³)	Custo de Transporte (R\$/m³)	Custo de Deslocamento das máquinas (R\$/m³)	Custo Total (R\$/m³)	Receita (R\$/m³)	Valor Presente Líquido (R\$/m³)
SCV	RV	0	3.144,9	420,5	1.035.991	11,3	10,1	12,1	0,000	33,6	36,7	3,171
8V	RV	0	3.144,9	316,2	1.034.708	11,3	10,2	12,1	0,000	33,6	36,7	3,167
4V	AL	0	3.153,5	319,0	1.028.612	11,4	10,1	12,1	0,000	33,7	36,6	2,960
SCV	AL	0	3.116,3	1.280,1	1.018.782	11,4	10,1	12,1	0,000	33,6	36,5	2,944
8V	AL	0	3.165,8	912,1	1.030.010	11,4	10,1	12,4	0,000	34,0	36,7	2,682
4V	RV	0	3.091,1	253,4	1.025.224	11,3	9,7	11,4	0,000	32,4	35,1	2,671
SCV	RV	500	3.126,3	316,5	1.029.489	11,3	10,1	12,1	0,073	33,6	36,7	3,095
8V	RV	500	3.144,9	316,2	1.034.708	11,3	10,2	12,1	0,073	33,6	36,7	3,094
4V	AL	500	3.153,5	319,0	1.028.612	11,4	10,1	12,1	0,073	33,7	36,6	2,887
SCV	AL	500	3.146,7	1.263,6	1.028.867	11,4	10,1	12,2	0,238	33,9	36,6	2,677
4V	RV	500	3.091,1	253,4	1.025.224	11,3	9,7	11,4	0,054	32,4	35,1	2,617
8V	AL	500	3.133,9	697,6	1.026.057	11,4	10,1	12,4	0,153	34,1	36,6	2,502
8V	RV	1000	3.191,5	314,8	1.048.279	11,3	10,2	12,2	0,119	33,9	36,9	3,030
SCV	RV	1000	3.126,3	316,5	1.029.489	11,3	10,1	12,1	0,147	33,6	36,7	3,021
4V	AL	1000	3.153,5	319,0	1.028.612	11,4	10,1	12,1	0,146	33,8	36,6	2,814
4V	RV	1000	3.091,1	253,4	1.025.224	11,3	9,7	11,4	0,108	32,5	35,1	2,563
SCV	AL	1000	3.146,7	1.263,6	1.028.867	11,4	10,1	12,2	0,477	34,1	36,6	2,439
8V	AL	1000	3.129,3	244,2	1.051.737	11,1	9,5	11,5	0,079	32,2	34,6	2,365
8V	RV	2500	3.191,5	314,8	1.048.279	11,3	10,2	12,2	0,297	34,1	36,9	2,852
SCV	RV	2500	3.126,3	316,5	1.029.489	11,3	10,1	12,1	0,367	33,9	36,7	2,801
4V	AL	2500	3.181,2	222,5	1.035.719	11,5	10,2	12,2	0,229	34,1	36,7	2,655
4V	RV	2500	3.091,1	253,4	1.025.224	11,3	9,7	11,4	0,270	32,7	35,1	2,401
8V	AL	2500	3.129,3	244,2	1.051.737	11,1	9,5	11,5	0,197	32,3	34,6	2,247
SCV	AL	2500	3.146,7	1.263,6	1.028.867	11,4	10,1	12,2	1,192	34,8	36,6	1,723
8V	RV	5000	3.191,5	314,8	1.048.279	11,3	10,2	12,2	0,593	34,4	36,9	2,556
SCV	RV	5000	3.126,3	316,5	1.029.489	11,3	10,1	12,1	0,733	34,2	36,7	2,435
4V	AL	5000	3.181,2	222,5	1.035.719	11,5	10,2	12,2	0,458	34,3	36,7	2,426
4V	RV	5000	3.134,1	263,7	1.039.622	11,3	9,7	11,5	0,455	33,0	35,2	2,163
8V	AL	5000	3.129,3	244,2	1.051.737	11,1	9,5	11,5	0,395	32,5	34,6	2,050
SCV	AL	5000	3.167,1	1.079,2	1.029.168	11,4	10,2	12,3	2,076	36,0	36,6	0,658

Fonte: dados da pesquisa.

O sistema também permite modificar a quantidade de iterações na tentativa de encontrar soluções ainda melhores, mas, certamente, demandará um maior esforço computacional. No entanto, o algoritmo demandou menos de trinta (30) segundos para processar 1.000 iterações.

Com objetivo de demonstrar o efeito na busca de soluções cada vez melhores ao aumentar a quantidade de iterações, processou-se oito vezes o cenário de número 26, sendo 1.000 iterações para cada processamento, totalizando 8.000 iterações. A Tabela 8 contém as cinco melhores soluções em termos de Valor Presente Líquido (R\$/m³) para cada um dos oito processamentos. A Tabela 9 apresenta a diferença percentual em relação à melhor solução de todas. A maior diferença entre as melhores soluções obtidas para cada um dos oito processamentos foi de 8%, indicando que quanto maior a quantidade de iterações, maior a chance de se aproximar da solução ótima.

Tabela 8 – Cinco melhores soluções expressas em VPL para cada uma das oito simulações de 1.000 iterações cada, em (R\$/m³).

Ordem	Simulação							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3,26	3,23	3,14	3,21	3,21	3,41	3,17	3,32
2	3,25	3,06	3,13	3,18	3,02	3,25	3,16	3,26
3	3,25	3,05	3,05	3,15	2,98	3,21	3,13	3,25
4	3,22	3,04	3,03	3,02	2,89	3,18	3,09	3,10
5	3,19	2,97	3,03	2,98	2,81	3,18	3,06	3,00

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 9 – Diferença percentual entre todas as cinco melhores soluções de cada uma das oito simulações de 1.000 iterações cada em relação a melhor solução, em (%).

Ordem	Simulação							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	95,5	94,6	92,0	93,9	93,9	100,0	92,8	97,3
2	95,2	89,5	91,6	93,2	88,5	95,3	92,4	95,6
3	95,1	89,3	89,3	92,3	87,2	94,1	91,5	95,2
4	94,3	88,9	88,8	88,5	84,6	93,1	90,4	90,7
5	93,4	87,1	88,6	87,2	82,2	93,0	89,7	87,8

Fonte: dados da pesquisa.

5.2 Cenários 1 a 10

Nesses cenários, quando termina a colheita em uma unidade de manejo, realiza-se o sorteio de um dos quatro vizinhos (4V) mais próximos para iniciar o corte. Duas alternativas de sorteio foram testadas, sendo cinco cenários com sorteio aleatório (AL) e cinco com roleta viciada (RV). O estado inicial é estático e conta com duas frentes de colheita.

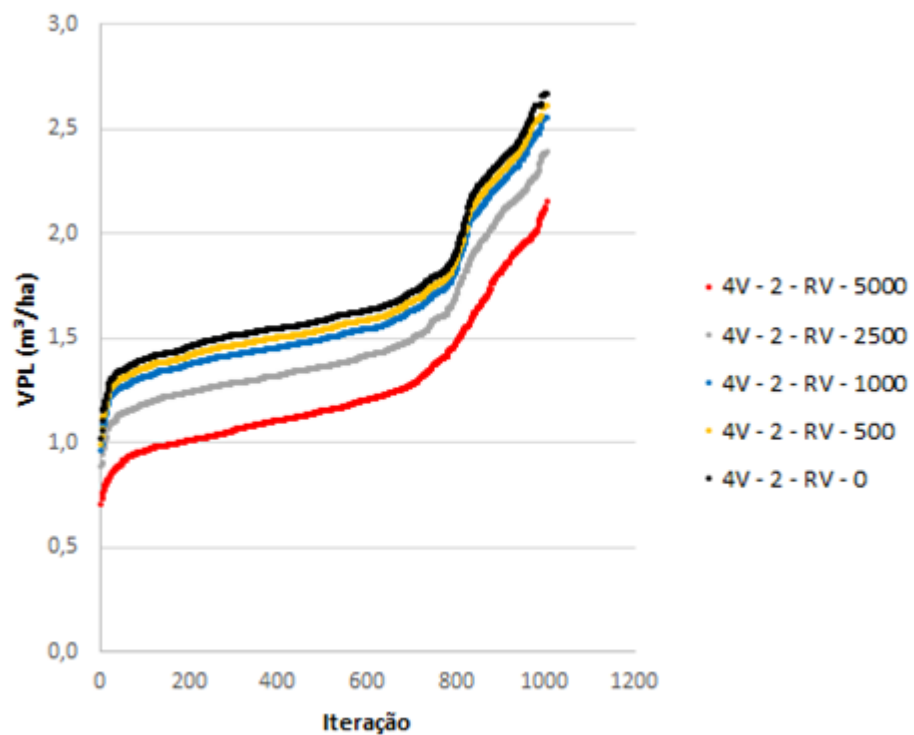
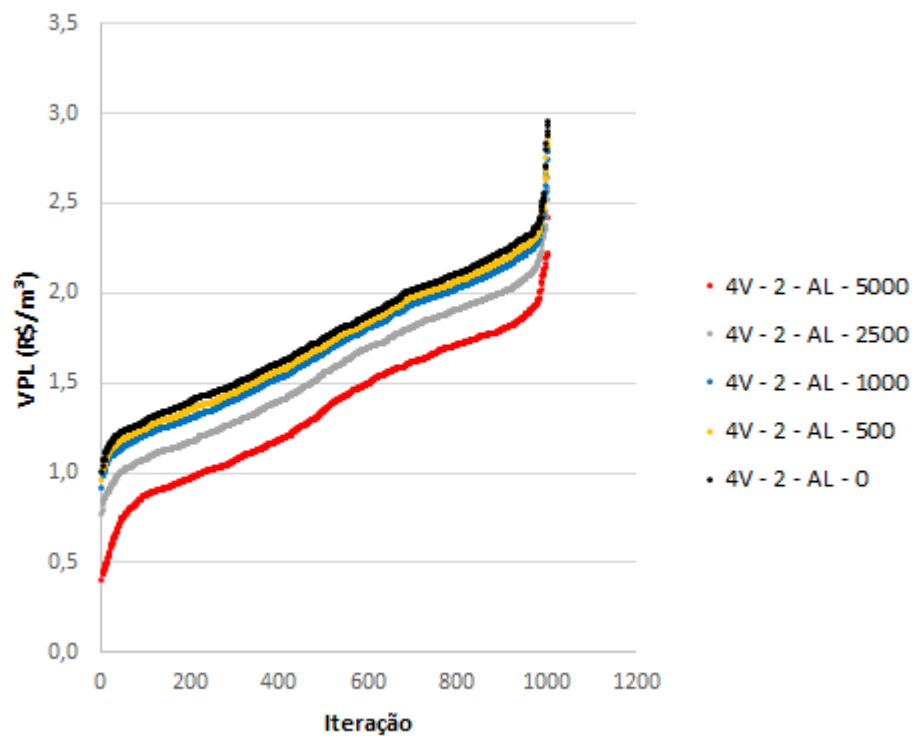
Os gráficos da Figura 18 ilustram resultados de 1.000 iterações plotadas em ordem crescente do VPL (R\$/m³) para custo de deslocamento, variando de zero (0) a cinco mil reais por quilômetro (R\$/km 5.000). Esses gráficos mostram o comportamento do VPL para cada custo, associado ao deslocamento das máquinas de colheita, sendo que, a extremidade direita das curvas indica a melhor solução obtida em cada cenário e a extremidade esquerda a pior solução.

A Figura 19 ilustra os resultados entre o sorteio aleatório (preto) e a roleta viciada (vermelho) para diferentes custos de deslocamento das máquinas de colheita. Todos os resultados indicaram superioridade do sorteio aleatório.

A Figura 20 mostra a dispersão entre o VPL e a distância percorrida com custo de deslocamento da colheita igual a R\$/km 1.000 e critérios de sorteio com roleta viciada e aleatório. Esse mesmo comportamento também ocorreu para todos os cenários de 1 a 10.

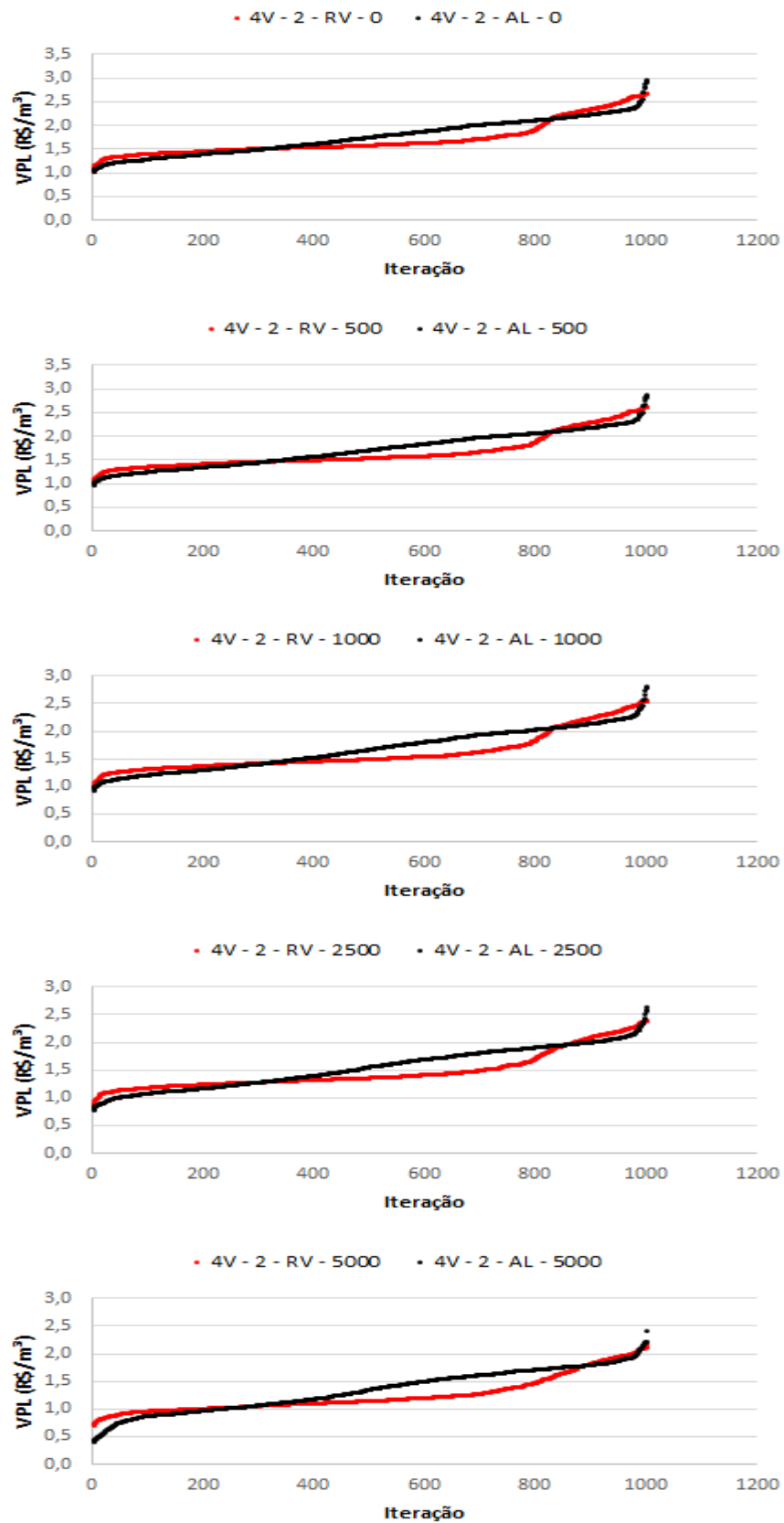
A Tabela 10 lista a correlação linear entre o VPL e as distâncias percorridas pelas máquinas de colheita para diferentes custos de deslocamento e regra de sorteio. Em todos os casos, a correlação diminui quando o custo de deslocamento da colheita aumenta, indicando uma tendência de diminuição na distância percorrida pelas máquinas quanto maior for o custo de deslocamento. No entanto, a iteração que obteve o maior lucro na Figura 20 não é a que apresenta a menor distância de deslocamento das máquinas entre as unidades de manejo, indicando que a solução de maior lucro pode estar associada a um agendamento que busque conjugar tanto o custo de deslocamento das máquinas de colheita quanto outras variáveis de influência, como a idade; a taxa de desconto; a produção na condição inicial; a taxa de crescimento da floresta; os custos de formação; custo de colheita; e custo de transporte da madeira. Esses resultados apontam que o raciocínio lógico de realizar a sequência de corte sempre para o vizinho mais próximo não garante maximização do lucro.

Figura 18 – Resultados do VPL para os cenários com quatro vizinhos, duas frentes de colheita, roleta viciada e diferentes custos de deslocamento da colheita (R\$/m³).



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 19 – Resultado do sorteio aleatório e roleta viciada para cada custo de deslocamento da colheita.



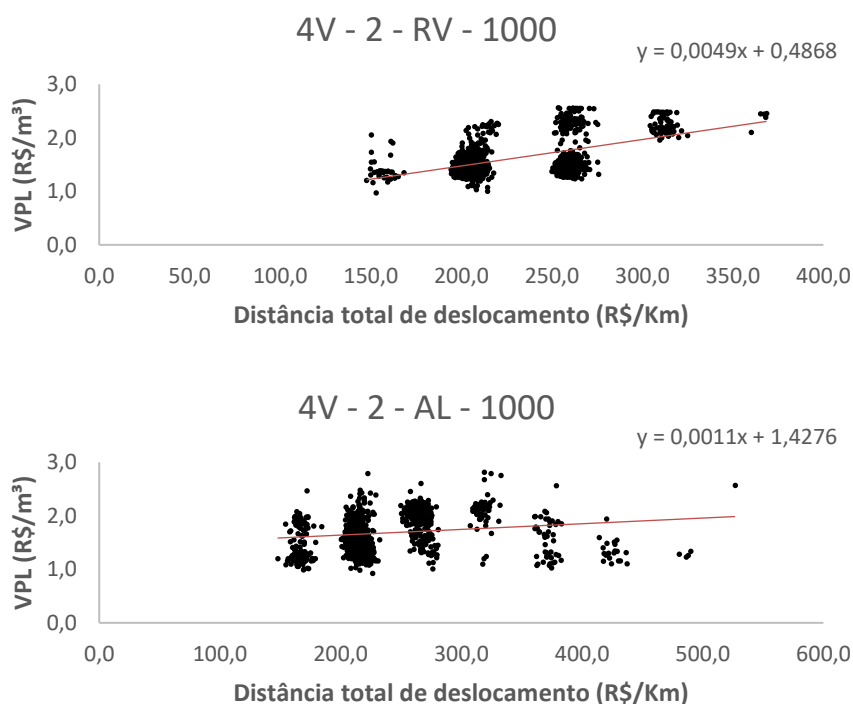
Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 10 – Correlação entre o lucro e a distância percorrida pelas máquinas de colheita para diferentes custos de deslocamento.

Custo de deslocamento da colheita (R\$/Km)	Correlação	
	Aleatório	Roleta Viciada
0,0	0,2373	0,5695
500,0	0,2031	0,5505
1.000,0	0,1684	0,5306
2.500,0	0,0635	0,4660
5.000,0	-0,1056	0,3417

Fonte: dados da pesquisa.

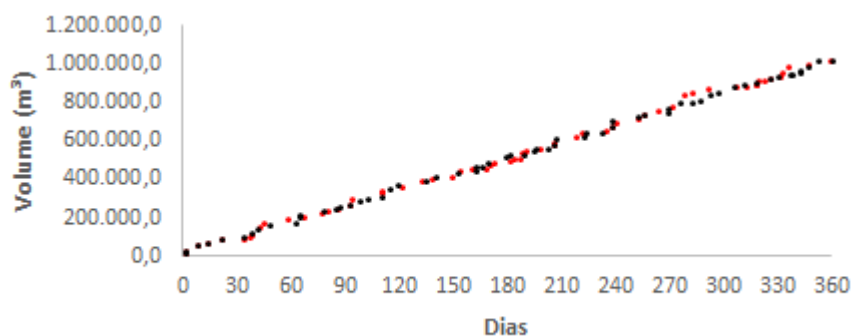
Figura 20 – Dispersão entre o VPL e a distância percorrida pelas máquinas de colheita para os sorteios roleta viciada e aleatório.



Fonte: dados da pesquisa.

A Figura 21 plota o volume de madeira acumulado ao longo do tempo para as iterações de maior (preto) e menor (vermelho) VPL, apresentaram um fornecimento periódico de forma regulada, ao longo de um ano, pois todos os cenários de 1 a 10 apontam o mesmo comportamento de fornecimento periódico e global de madeira.

Figura 21 – Volume acumulado de madeira colhida ao longo de um ano para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento e sorteio aleatório.



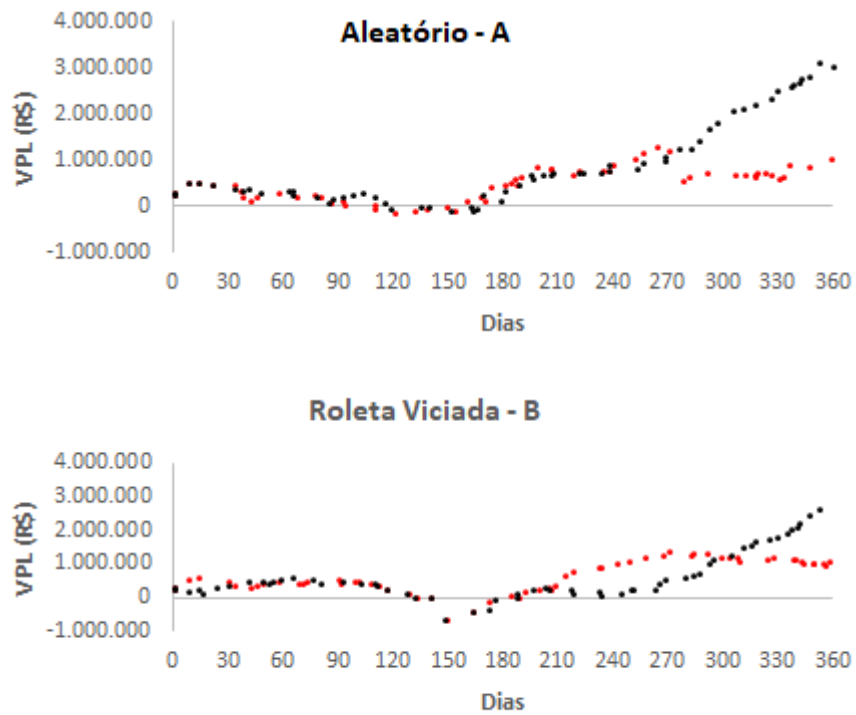
Fonte: dados da pesquisa.

Uma questão fundamental para sobrevivência de qualquer empreendimento é manter o fluxo de caixa positivo, caso contrário torna-se necessário realizar empréstimos para honrar compromissos financeiros e manter o negócio girando. A simulação de cenários permite enxergar com antecipação quando e quanto será necessário realizar empréstimos.

A ascensão ou a queda do VPL nas Figuras 22 e 23 chegam a apresentar lucro ou prejuízo para diferentes períodos do ano. Isso ocorre quando o agendamento da colheita segue uma sequência de corte em unidades de manejo com VPL negativo ou positivo. No caso dessa floresta em específico, pode-se observar, nas Tabela 1 e 10, que unidades de manejo com idade avançada ou baixas produtividades apresentam VPL negativo.

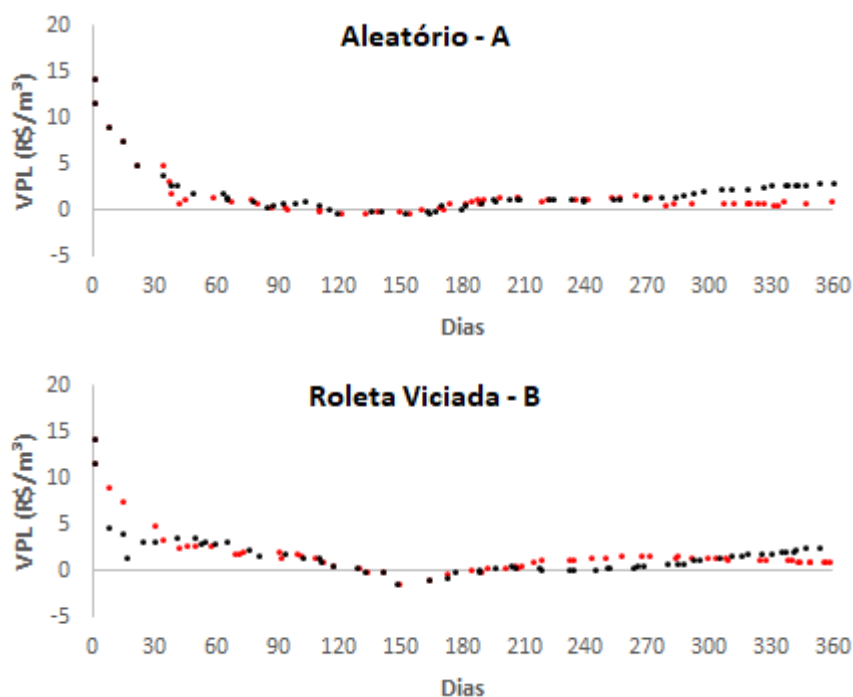
No entanto, são resultados com 1.000 iterações e estado inicial estático. Por isso, é interessante que trabalhos futuros testem o processamento de iterações até que uma ou mais soluções apresente fluxo de caixa acumulado sempre positivo durante o horizonte de planejamento, pois, por mais que não seja a solução de maior VPL, ela será encontrada caso exista.

Figura 22 – Comportamento do VPL (R\$) acumulado ao longo do tempo (dias) para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento da colheita, com sorteio aleatório (A) e roleta viciada (B).



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 23 – Comportamento do VPL (R\$/m³) ao longo do tempo (dias) para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento da colheita, com sorteio aleatório (A) e roleta viciada (B).



Fonte: dados da pesquisa.

As Tabelas 11, 12, 13 e 14 apresentam resultados para a melhor e a pior solução obtida dentre as 1.000 iterações do cenário “4V – AL – 1000”. A sequência de corte das unidades de manejo para as duas frente de colheita se encontra na Tabela 11. A Tabela 12 mostra o dia em que cada unidade de manejo será colhida. O lucro ou prejuízo por unidade de manejo na data da colheita é apresentado na Tabela 13. A idade ótima de corte das unidades de manejo se encontra na Tabela 14.

Tabela 11 – Sequência de corte por frente de colheita (0 e 1).

1 - 28	0 - 27	0 - 28	0 - 29	0 - 26	0 - 14	0 - 13	0 - 12	0 - 15	0 - 16
0 - 18	1 - 27	0 - 17	0 - 31	0 - 1					0 - 11
1 - 4	1 - 6	1 - 9	1 - 12	1 - 10	0 - 2				
1 - 3	1 - 7	1 - 8	0 - 6	0 - 5	0 - 4	0 - 3	0 - 10	0 - 9	1 - 11
1 - 5	1 - 2	1 - 1	0 - 8	0 - 7	1 - 26	0 - 25	1 - 24	1 - 25	0 - 30
1 - 17	0 - 22	0 - 19	0 - 20	0 - 21	1 - 21	0 - 24	1 - 23	1 - 22	
1 - 19	1 - 15	1 - 16	1 - 13	1 - 14					
1 - 18	0 - 23								
	1 - 20					1 - 31	1 - 32		
			1 - 29	1 - 30					
					1 - 16	1 - 18	1 - 17	1 - 19	
1 - 15	1 - 20	1 - 14		0 - 1					0 - 10
1 - 6	1 - 5	1 - 13	1 - 9	0 - 7	0 - 2				
1 - 7	1 - 4	1 - 8	0 - 9	0 - 8	0 - 6	0 - 3	0 - 5	0 - 4	1 - 11
1 - 3	1 - 2	1 - 1	1 - 12	1 - 10	0 - 28		0 - 29		
1 - 21	0 - 22	1 - 22	1 - 23	0 - 18	1 - 24	0 - 19	1 - 28	1 - 25	0 - 21
0 - 17	0 - 16	0 - 12	0 - 20	0 - 11					
0 - 15	0 - 13							1 - 26	
	0 - 14					0 - 23	0 - 24	0 - 25	1 - 31
		0 - 26	1 - 27	1 - 30	0 - 27	1 - 29	1 - 32		

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 12 – Dia da colheita do horizonte de planejamento para cada unidade de manejo.

338	318	326	337	311	169	166	162	181	189
202	330	195	353	1					140
41	65	92	135	103	14				
34	78	85	65	48	38	21	115	110	119
63	8	1	98	87	306	292	287	297	343
206	253	207	224	238	256	276	283	269	
233	179	196	152	163					
222	269								
	238					360	365		
			342	347					
					173	187	184	190	
168	198	160		1					132
58	45	149	93	77	14				
80	37	86	110	94	67	21	42	38	121
34	8	1	138	110	336		359		
206	291	221	238	240	252	256	323	264	282
235	218	170	271	154					
206	181							278	
	188					307	312	318	347
		319	318	333	331	326	361		

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 13 – VPL (R\$/m³) para cada unidade de manejo na data da colheita.

10,4	7,2	7,8	9,0	5,8	18,5	18,9	18,7	16,9	16,6
17,5	16,5	19,1	9,9	14,3					0,2
2,7	6,3	3,8	2,9	2,9	-4,2				
-7,2	-11,4	-11,4	-2,5	-2,9	-3,9	-1,6	-2,9	-17,1	-6,4
7,0	6,8	6,1	4,2	4,2	8,3	9,2	8,2	10,0	7,7
-0,3	3,5	0,9	1,1	5,8	5,4	5,8	6,7	5,7	
1,3	-4,7	-6,1	-4,4	-4,2					
-0,1	3,7								
	-4,3					-9,1	0,1		
			-3,2	2,5					
					18,4	18,9	18,6	16,9	
17,6	16,9	19,4		14,3					0,1
2,7	6,3	3,7	3,0	2,9	-4,2				
-7,2	-11,4	-11,4	-2,5	-2,9	-4,0	-1,6	-2,8	-17,0	-6,4
7,1	6,8	6,1	4,2	4,2	7,4		10,1		
-1,8	3,5	2,2	1,2	5,8	5,4	5,8	6,4	5,7	6,2
1,3	-4,8	-6,1	-4,2	-4,4					
-0,2	3,6							-9,9	
	-4,3					-9,7	-0,1	-3,7	-3,1
		2,2	2,2	2,4	-9,1	-9,8	2,4		

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 14 – Idade (anos) da florestal na data da colheita.

6,1	6,1	6,1	6,1	6,0	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1
6,1	6,5	6,1	6,0	5,0					7,8
7,5	7,5	7,8	7,7	7,6	7,6				
22,8	23,0	23,0	22,9	22,9	22,9	22,8	23,1	23,1	23,1
7,4	7,3	7,2	7,5	7,5	6,1	6,2	6,2	6,2	6,3
6,0	6,1	6,0	6,0	6,1	6,0	6,1	6,1	6,1	
6,0	21,2	21,3	21,2	21,2					
6,3	6,4								
	26,9					6,2	6,2		
			6,1	6,1					
					6,0	6,1	6,1	6,1	
6,0	6,1	6,0		5,0					7,8
7,6	7,5	7,9	7,6	7,6	7,6				
23,0	22,8	23,0	23,1	23,0	22,9	22,8	22,9	22,9	23,1
7,3	7,3	7,2	7,6	7,6	6,2		6,4		
6,0	6,2	6,0	6,1	6,1	6,0	6,1	6,2	6,1	6,1
6,0	21,3	21,2	21,5	21,2					
6,2	6,1							30,5	
	26,7					6,0	6,0	6,0	6,0
		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,1		

Fonte: dados da pesquisa.

5.3 Cenários 11 a 20

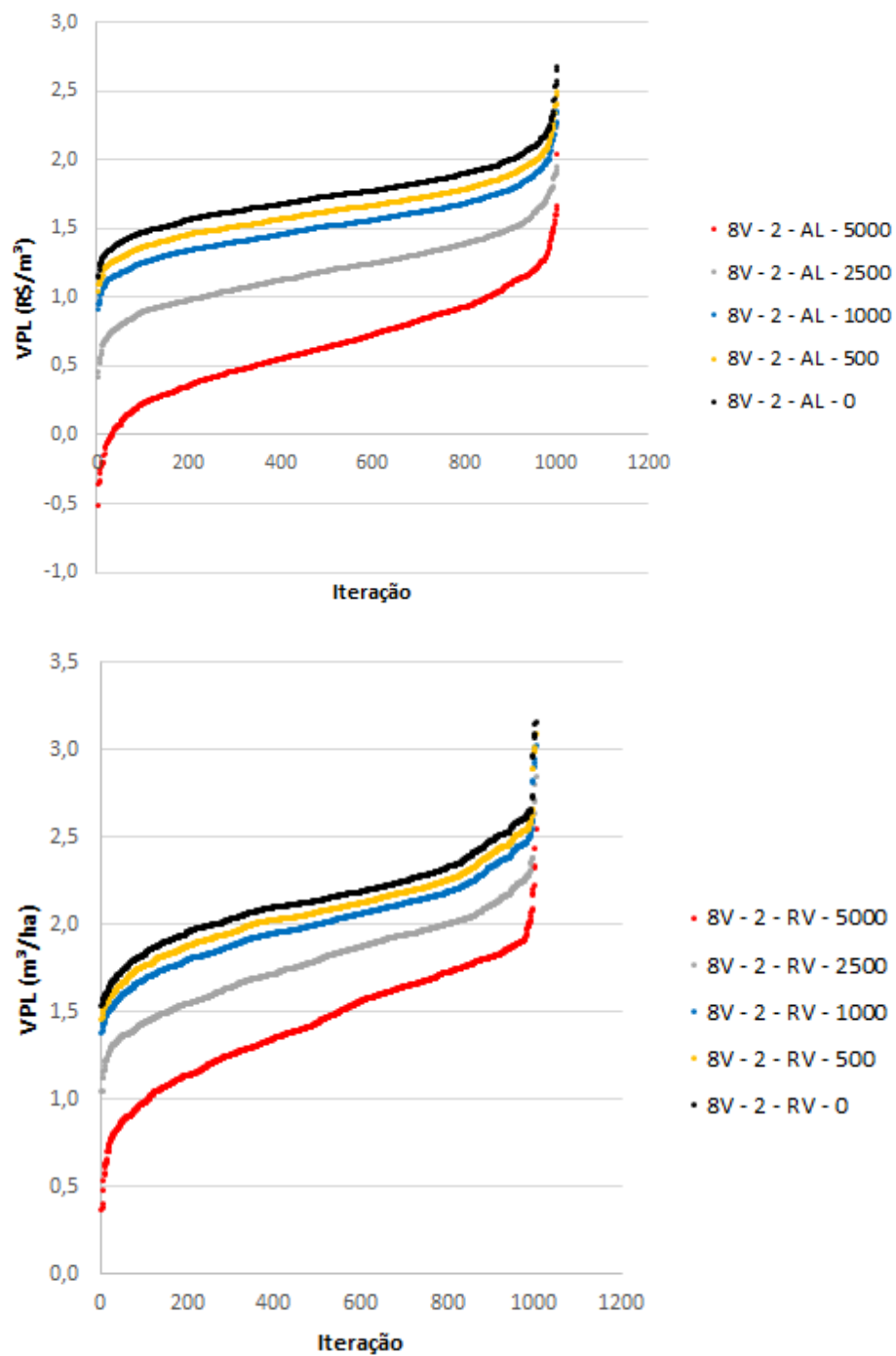
Nesses cenários, quando termina a colheita em uma unidade de manejo, realiza-se o sorteio de um dos oito vizinhos (8V) mais próximos para iniciar o corte. Duas alternativas de sorteio foram testadas, sendo cinco cenários com sorteio aleatório (AL) e cinco com roleta viciada (RV). O estado inicial é estático e conta com duas frentes de colheita.

Os gráficos da Figura 24 ilustram resultados de 1.000 iterações plotadas em ordem crescente do VPL (R\$/m³), para custo de deslocamento, variando de zero (0) a cinco mil reais por quilômetro (R\$/km 5.000). Esses gráficos mostram o comportamento do VPL para cada custo associado ao deslocamento das máquinas de colheita, sendo que, a extremidade direita das curvas indica a melhor solução obtida em cada cenário e a extremidade esquerda a pior solução.

A Figura 25 ilustra os resultados entre o sorteio aleatório (preto) e a roleta viciada (vermelho), para diferentes custos de deslocamento das máquinas de colheita. Todos os resultados apontaram superioridade do sorteio com a roleta viciada, sendo esse um resultado oposto quando comparado aos cenários com quatro vizinhos, indicando que a flexibilização na quantidade de vizinhos favorece a busca pela solução ótima até um certo limite. Trabalhos futuros podem explorar essa linha de raciocínio ao promover cenários com outros critérios de vizinhança, quantidade de frentes de colheita no estágio inicial, horizonte de planejamento, dentre outros. Mesmo assim, é provável que cada povoamento florestal forneça diferentes quantidades ótimas de vizinhança, tornando necessário inserir iterações que variem a quantidade de vizinhos de forma automatizada.

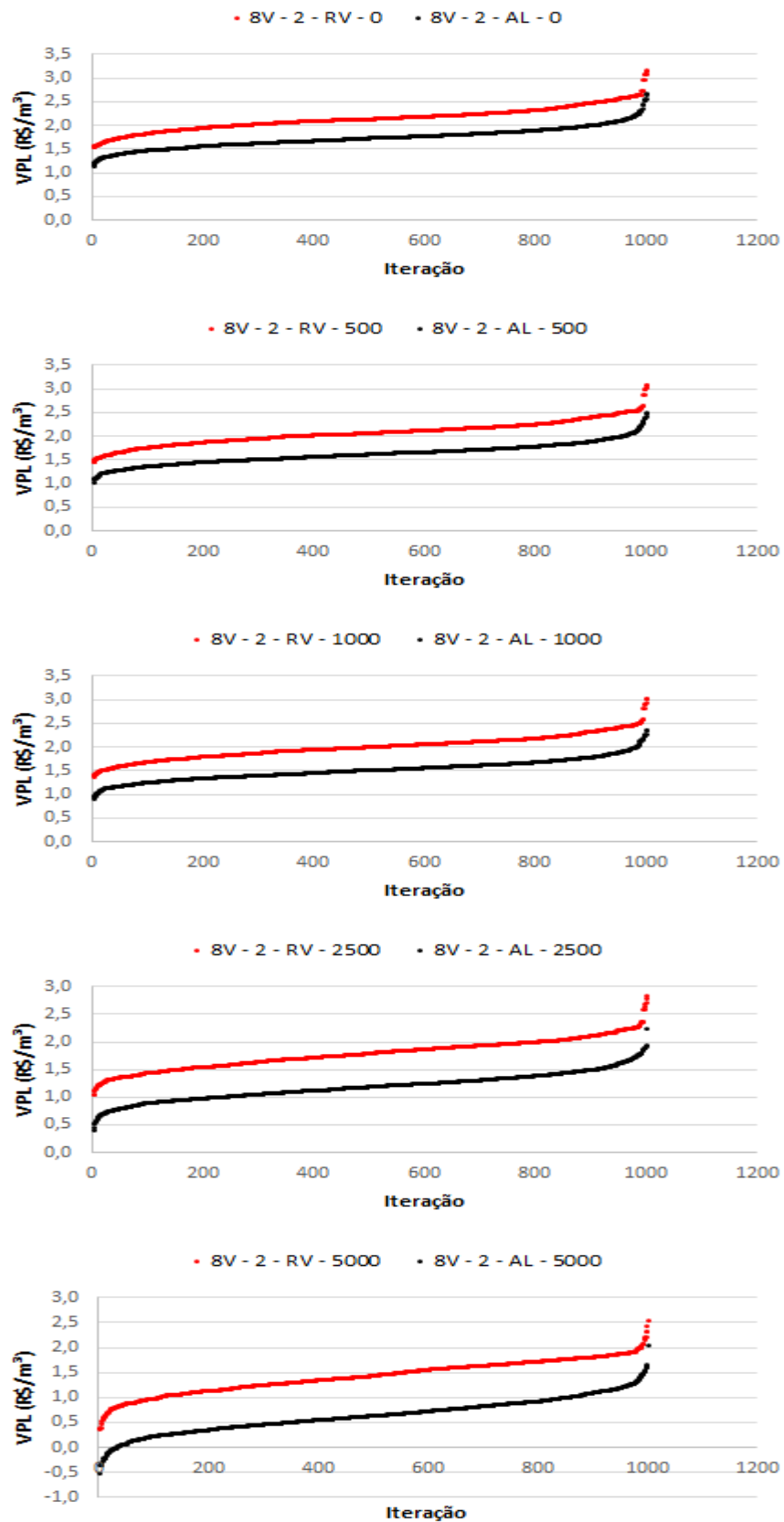
Os cenários com oito vizinhos apresentam diferença mais ampla entre os critérios de sorteio quando comparado aos cenários com quatro vizinhos (Figuras 19 e 25).

Figura 24 – Resultados do VPL para os cenários com oito vizinhos, duas frentes de colheita, roleta viciada e diferentes custos de deslocamento da colheita (R\$/m³).



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 25 – Resultado do sorteio aleatório e roleta viciada para cada custo de deslocamento da colheita.



Fonte: dados da pesquisa.

Quando a correlação linear é positiva, quanto maior é o valor no eixo “x”, maior será o valor do eixo “y”. Quando a correlação é negativa, quanto maior é o valor no eixo “x”, menor será o valor do eixo “y”. Para este trabalho, “x” é a distância total de deslocamento das máquinas de colheita e “y” é o VPL Global.

A Tabela 15 lista a correlação linear entre o VPL e a distância percorrida pelas máquinas de colheita para diferentes custos de deslocamento e regras de sorteio. Em todos os casos, a correlação diminui quando o custo de deslocamento da colheita aumenta, indicando uma tendência de diminuição na distância percorrida pelas máquinas, em função da elevação no custo de deslocamento. No entanto, a iteração que obteve o maior lucro na Figura 26 não é a que apresenta a menor distância de deslocamento das máquinas entre as unidades de manejo, indicando mais uma vez que a solução de maior lucro pode estar associada a um agendamento que busque conjugar tanto o custo de deslocamento das máquinas de colheita quanto outras variáveis.

Tabela 15 – Correlação entre o lucro e a distância percorrida pelas máquinas de colheita para diferentes custos de deslocamento.

Custo de Deslocamento da Colheita (R\$/km)	Correlação	
	Aleatório	Roleta Viciada
0,0	0,0851	0,0448
500,0	-0,0404	-0,0483
1.000,0	-0,1643	-0,1404
2.500,0	-0,4723	-0,3894
5.000,0	-0,7305	-0,6651

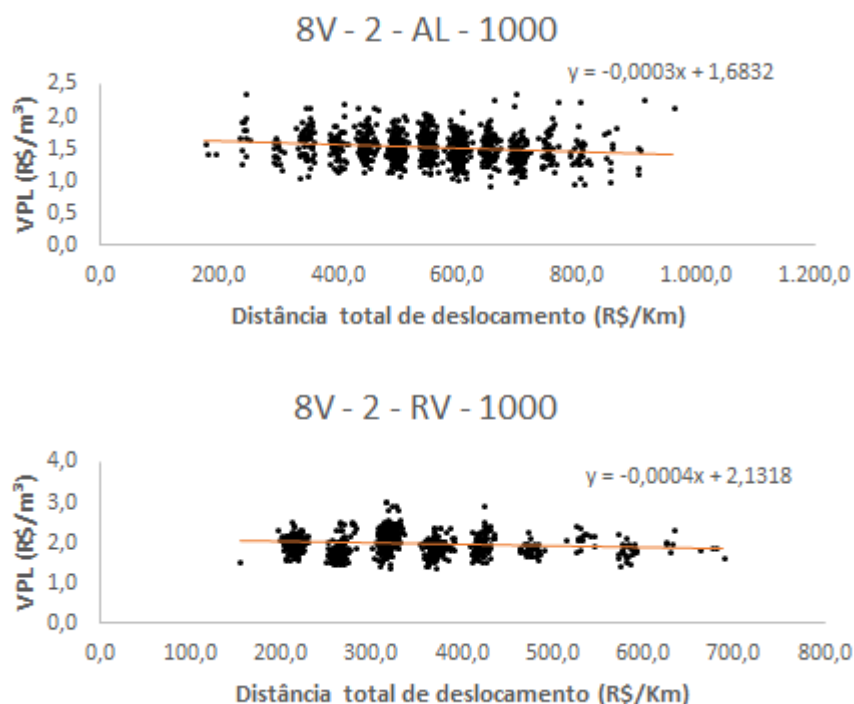
Fonte: dados da pesquisa.

A Figura 26 mostra a dispersão entre o VPL e a distância percorrida com custo de deslocamento da colheita igual a R\$/km 1.000 e critérios de sorteio com roleta viciada e aleatório. Esse mesmo comportamento também ocorreu para todos os cenários de 11 a 20.

Ao comparar as correlações entre os cenários com critérios de quatro e oito vizinhos, observa-se que todos os valores dos cenários com oito vizinhos são menores e negativos para todos os cenários com custo de deslocamento maior ou igual a R\$500,00/km.

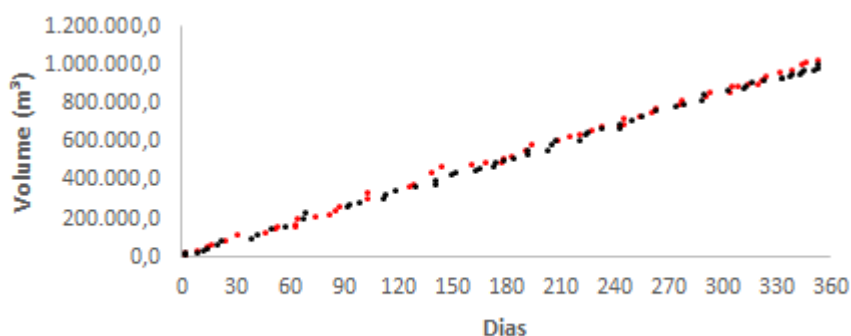
A Figura 27 plota o volume de madeira acumulado ao longo do tempo para as iterações de maior (preto) e menor (vermelho) VPL, apresentaram um fornecimento periódico de forma regulada ao longo de um ano, pois todos os cenários de 11 a 20 apontam o mesmo comportamento de fornecimento periódico e global de madeira.

Figura 26 – Gráfico de dispersão entre o VPL a distância percorrida pelas máquinas de colheita para os sorteios aleatório e roleta viciada.



Fonte: dados da pesquisa.

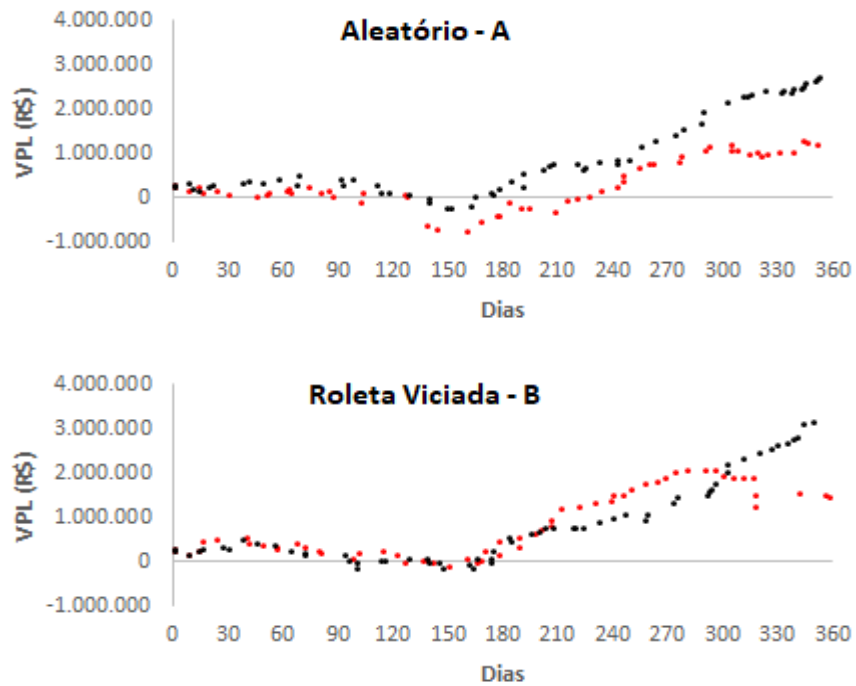
Figura 27 – Volume acumulado de madeira colhida ao longo de um ano para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento e sorteio aleatório.



Fonte: dados da pesquisa.

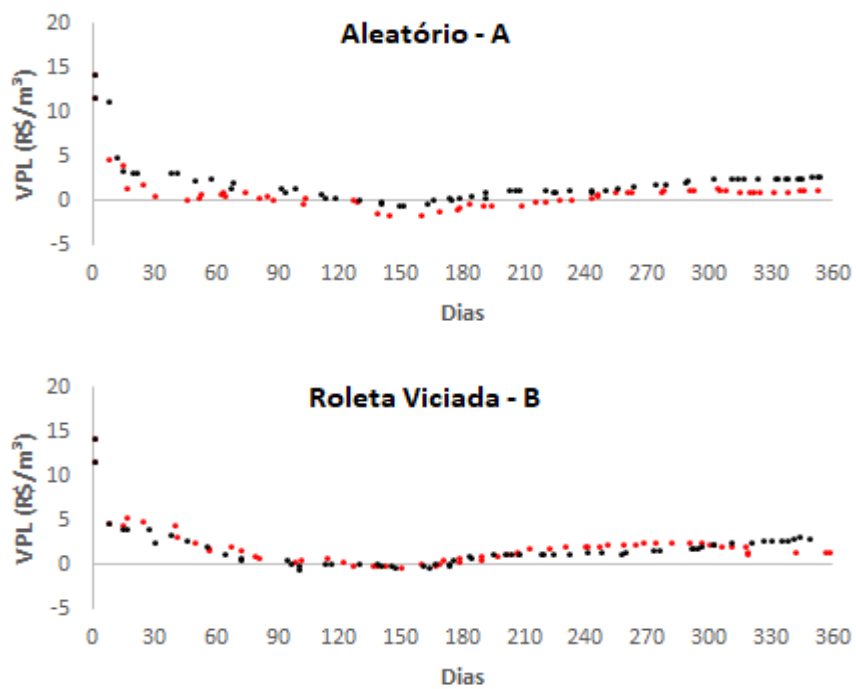
A ascensão e a queda do VPL nas Figuras 28 e 29 chegam a apresentar prejuízo ou lucro para diferentes períodos do ano. Esses resultados também foram observados nos cenários com quatro vizinhos. De modo geral, os gráficos da roleta viciada apresentam valores mais próximos entre a melhor e a pior solução em comparação ao sorteio aleatório (Figuras 28 e 29).

Figura 28 – Comportamento do VPL (R\$) acumulado ao longo do tempo (dias) para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento da colheita para sorteio aleatório (A) e roleta viciada (B).



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 29 – Comportamento do VPL (R\$/m³) ao longo do tempo (dias) para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento da colheita, com sorteio aleatório (A) e roleta viciada (B).



Fonte: dados da pesquisa.

As Tabelas 16, 17, 18 e 19 apresentam resultados para a melhor e a pior solução obtida dentre as 1.000 iterações do cenário “8V – RV – 1000”. A sequência de corte das unidades de manejo para as duas frente de colheita se encontra na Tabela 16. A Tabela 17 mostra o dia em que cada unidade de manejo será colhida. O lucro ou prejuízo por unidade de manejo na data da colheita é apresentado na Tabela 18. A idade ótima de corte das unidades de manejo se encontra na Tabela 19.

Tabela 16 – Sequência de corte por frente de colheita (0 e 1).

0 - 29	0 - 25	0 - 30	1 - 28	0 - 26	0 - 12	0 - 18	1 - 25	0 - 14	0 - 13
0 - 16	0 - 17	0 - 15	0 - 31	0 - 1	0 - 32				0 - 11
1 - 6	1 - 5	1 - 4	1 - 11	0 - 2	1 - 12				
1 - 7	1 - 3	1 - 9	1 - 10	0 - 5	0 - 6	0 - 7	0 - 8	0 - 9	0 - 10
1 - 8	1 - 2	1 - 1	0 - 3	0 - 4	0 - 24	1 - 26	1 - 27	0 - 27	0 - 28
1 - 20	0 - 19	0 - 20	1 - 21	1 - 22	0 - 21	0 - 22	0 - 23	1 - 23	1 - 24
1 - 19	1 - 16	1 - 15	1 - 14	1 - 13					
1 - 18	1 - 17								
	1 - 29								
		1 - 30		1 - 31					
0 - 24	1 - 24		1 - 25	0 - 22		1 - 22	0 - 14		0 - 15
1 - 21		1 - 26		0 - 1	0 - 30				0 - 13
1 - 12	1 - 3	1 - 2	0 - 2	0 - 6	0 - 7				
1 - 5	1 - 6	0 - 8	0 - 9	1 - 7	0 - 3	0 - 4	1 - 8	0 - 5	0 - 12
1 - 9	1 - 4	1 - 1	1 - 10	0 - 11	0 - 20	1 - 23	0 - 23		0 - 21
1 - 16	0 - 17	1 - 27	1 - 18	1 - 17	0 - 29	0 - 18	0 - 25	1 - 28	
1 - 20	1 - 19	0 - 10	1 - 11	1 - 15					
0 - 19	1 - 14							0 - 16	
	1 - 13					0 - 28		1 - 29	1 - 32
		0 - 27	1 - 30	1 - 31	0 - 26				

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 17 – Dia da colheita do horizonte de planejamento para cada unidade de manejo.

328	295	333	327	303	161	207	296	179	173
195	200	187	344	1	363				139
66	53	42	125	14	142				
88	34	96	104	52	69	78	95	119	123
94	8	1	30	41	271	300	318	309	318
229	209	224	245	259	241	253	268	274	288
224	188	177	165	149					
212	205								
	334								
		352		365					

Continua...

315	292		300	299		272	173		177
267		306		1	360				151
135	19	8	14	60	77				
57	64	84	91	71	30	39	87	56	134
111	32	1	113	122	265	274	306		289
200	223	314	231	216	347	239	320	331	
262	246	112	124	183					
254	175							183	
	157					342		345	364
		329	347	351	323				

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 18 – VPL (R\$/m³) para cada unidade de manejo na data da colheita.

10,0	7,1	7,8	8,8	5,8	18,5	18,4	11,8	16,9	16,5
17,6	17,0	19,2	10,0	14,3	11,6				0,2
2,7	6,3	3,8	3,0	2,9	-3,9				
-7,3	-11,3	-11,4	-2,5	-2,9	-4,0	-1,6	-2,9	-17,1	-6,4
7,1	6,8	6,1	4,2	4,2	7,3	10,2	10,1	10,0	7,8
-0,2	2,1	2,2	1,2	5,8	5,4	5,8	6,7	5,7	6,3
1,3	-4,7	-6,1	-4,1	-4,4					
-0,1	3,6								
	-4,5								
		2,4		2,5					

10,1	7,1		8,9	5,7		18,1	18,7		16,6
12,3		18,8		14,3	8,7				0,2
1,7	6,3	3,8	2,9	2,9	-4,0				
-7,2	-11,4	-11,4	-2,5	-2,9	-3,9	-1,6	-2,9	-17,0	-6,4
6,5	6,8	6,1	4,2	2,4	7,3	10,2	10,0		7,7
-0,4	3,4	1,3	1,1	5,8	5,5	5,7	0,3	5,7	
1,4	-4,8	-6,5	-4,4	-4,2					
-0,1	3,6							-9,9	
	-4,4					-9,3		-4,1	-3,0
		2,3	2,3	2,5	-9,2				

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 19 – Idade (anos) da florestal quando foi colhida.

6,1	6,1	6,1	6,1	6,0	6,0	6,1	6,4	6,1	6,0
6,1	6,1	6,1	6,0	5,0	6,0				7,8
7,6	7,5	7,6	7,7	7,4	7,9				
23,0	22,8	23,0	23,0	22,9	22,9	23,0	23,0	23,1	23,1
7,5	7,3	7,2	7,3	7,4	6,0	6,3	6,3	6,2	6,3
6,1	6,0	6,0	6,1	6,1	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1
6,0	21,2	21,3	21,2	21,2					
6,2	6,2								
	27,1								
		6,1		6,1					

Continua...

6,1	6,0		6,0	6,0		6,3	6,0		6,0
6,3		6,4		5,0	6,0				7,9
7,8	7,4	7,5	7,4	7,5	7,8				
22,9	22,9	23,0	23,0	22,9	22,8	22,9	23,0	22,9	23,1
7,5	7,3	7,2	7,6	7,6	6,0	6,2	6,2		6,2
6,0	6,1	6,3	6,1	6,0	6,3	6,0	6,2	6,2	
6,1	21,4	21,1	21,1	21,3					
6,3	6,1							30,3	
	26,7					6,1		6,1	6,1
		6,0	6,1	6,1	6,0				

Fonte: dados da pesquisa.

A Tabela 20 lista a representatividade dos custos, do lucro e da receita obtida pelo incremento corrente do volume durante o horizonte de planejamento (um ano). A representatividade foi calculada de forma percentual, utilizando a receita total como denominador. Todos os valores utilizados para calcular o custo e a receita foram corrigidos com taxa de desconto de 10% ao ano.

Ao analisar a diferença entre a melhor e a pior solução dos cenários 11 a 20 (Tabela 20), observa-se que:

- ✓ O custo de formação florestal foi o que mais influenciou na lucratividade para o sorteio aleatório com custo menor ou igual a R\$/km 1.000,00;
- ✓ O custo de deslocamento foi o que mais influenciou na lucratividade para o sorteio aleatório com custo maior ou igual a R\$/km 2.500,00;
- ✓ O custo de formação florestal foi o que mais influenciou na lucratividade para o sorteio da roleta viciada com custo menor ou igual a R\$/km 2.500,00;
- ✓ O custo de deslocamento foi o que mais influenciou na lucratividade para o sorteio da roleta viciada com custo igual a R\$/km 5.000,00; e
- ✓ As melhores soluções apresentam maior incremento corrente durante o horizonte de planejamento para cenários com roleta viciada.

Tabela 20 – Representatividade dos custos, do lucro e da receita obtida pelo incremento corrente desde a primeira até a última unidade de manejo a ser colhida durante o período de um ano.

Vizinhança	Evolução	Custo de Deslocamento (R\$/Km)	Solução	Custo de Formação (%)	Custo de Colheita (%)	Custo de Transporte (%)	Custo de Deslocamento (%)	Custo Madeira Posto Fábrica (%)	Receita Incremento Corrente (%)	Receita (%)	VPL (%)
8V	AL	0	Melhor	31,19	27,67	33,83	0,00	92,68	9,50	100,00	7,32
8V	AL	0	Pior	34,03	27,87	34,67	0,00	96,57	9,18	100,00	3,43
Diferença				-2,85	-0,20	-0,84	0,00	-3,89	0,32	0,00	3,89
8V	AL	500	Melhor	31,11	27,67	33,98	0,42	93,17	9,50	100,00	6,83
8V	AL	500	Pior	34,30	27,98	34,29	0,36	96,93	9,56	100,00	3,07
Diferença				-3,20	-0,32	-0,31	0,06	-3,76	-0,06	0,00	3,76
8V	AL	1000	Melhor	32,17	27,60	33,16	0,23	93,16	9,53	100,00	6,84
8V	AL	1000	Pior	34,30	27,98	34,29	0,72	97,29	9,56	100,00	2,71
Diferença				-2,13	-0,39	-1,12	-0,49	-4,13	-0,03	0,00	4,13
8V	AL	2500	Melhor	32,17	27,60	33,16	0,57	93,50	9,53	100,00	6,50
8V	AL	2500	Pior	33,78	27,79	34,47	2,72	98,76	9,39	100,00	1,24
Diferença				-1,61	-0,19	-1,31	-2,15	-5,26	0,14	0,00	5,26
8V	AL	5000	Melhor	32,17	27,60	33,16	1,14	94,07	9,53	100,00	5,93
8V	AL	5000	Pior	33,78	27,79	34,47	5,44	101,49	9,39	100,00	-1,49
Diferença				-1,61	-0,19	-1,31	-4,30	-7,41	0,14	0,00	7,41
8V	RV	0	Melhor	30,77	27,63	32,97	0,00	91,38	9,53	100,00	8,62
8V	RV	0	Pior	33,69	27,74	34,02	0,00	95,44	8,75	100,00	4,56
Diferença				-2,91	-0,10	-1,05	0,00	-4,06	0,77	0,00	4,06
8V	RV	500	Melhor	30,77	27,63	32,97	0,20	91,58	9,53	100,00	8,42
8V	RV	500	Pior	33,49	27,71	34,26	0,25	95,71	9,27	100,00	4,29
Diferença				-2,71	-0,08	-1,29	-0,05	-4,13	0,26	0,00	4,13
8V	RV	1000	Melhor	30,67	27,66	33,15	0,32	91,80	9,59	100,00	8,20
8V	RV	1000	Pior	33,49	27,71	34,26	0,49	95,95	9,27	100,00	4,05
Diferença				-2,82	-0,05	-1,11	-0,17	-4,16	0,32	0,00	4,16
8V	RV	2500	Melhor	30,67	27,66	33,15	0,80	92,28	9,59	100,00	7,72
8V	RV	2500	Pior	33,42	27,70	33,90	1,88	96,90	9,34	100,00	3,10
Diferença				-2,75	-0,04	-0,75	-1,08	-4,62	0,25	0,00	4,62
8V	RV	5000	Melhor	30,67	27,66	33,15	1,61	93,08	9,59	100,00	6,92
8V	RV	5000	Pior	32,90	27,72	33,83	4,48	98,93	9,55	100,00	1,07
Diferença				-2,23	-0,06	-0,68	-2,87	-5,85	0,04	0,00	5,85

Fonte: dados da pesquisa.

5.4 Cenários 21 a 30

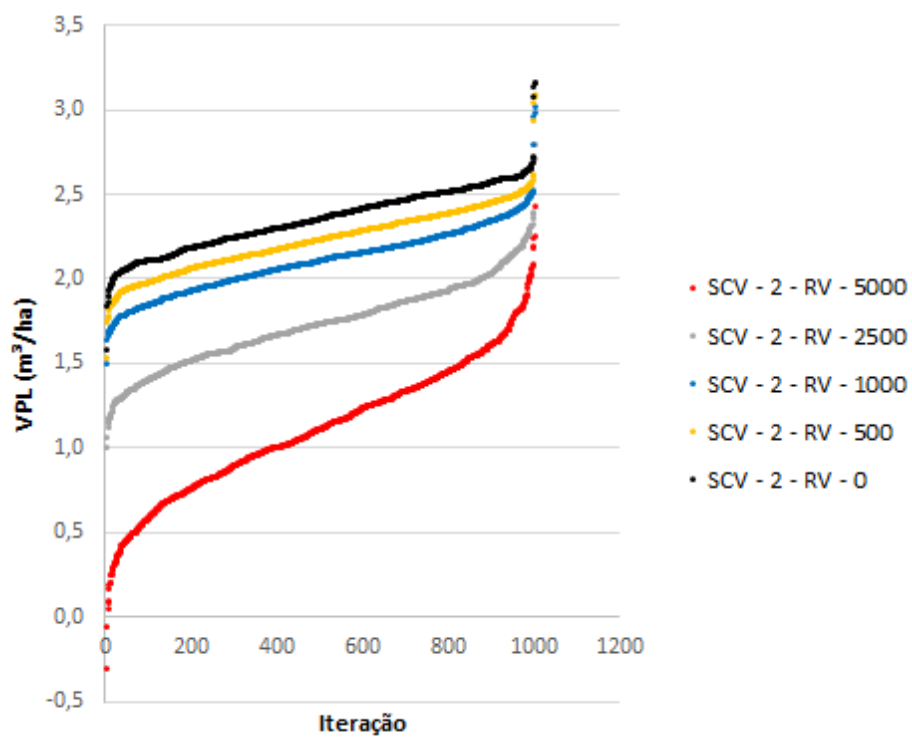
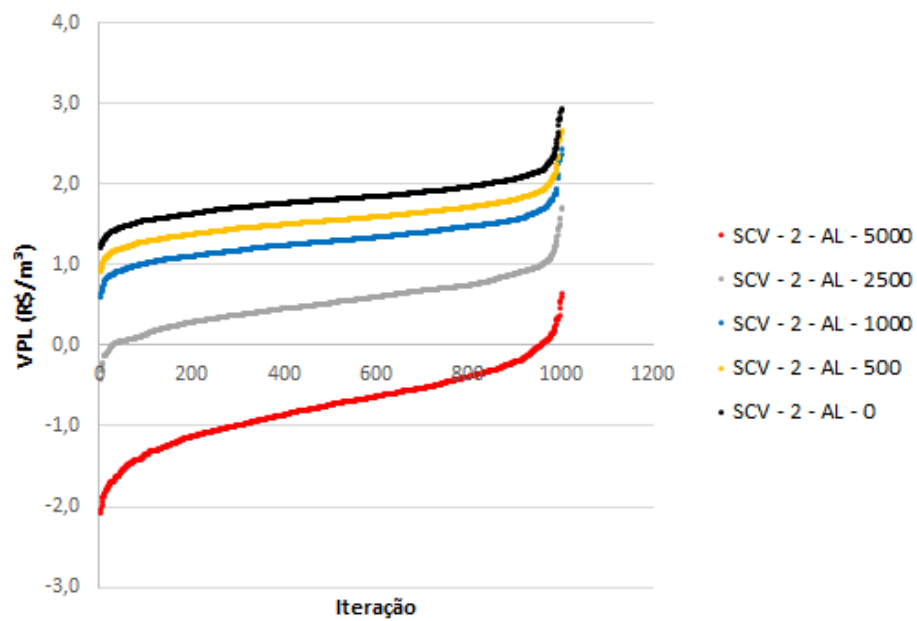
Esses cenários foram processados sem critério de vizinhança, sendo cinco sorteados de forma aleatório (AL) e cinco com roleta viciada (RV). O estado inicial conta com duas frentes de colheita.

Os gráficos da Figura 30 ilustram resultados de 1.000 iterações plotadas em ordem crescente do VPL (R\$/m³) para custo de deslocamento variando de zero (0) a cinco mil reais por quilômetro (R\$/km 5.000).

A superioridade da roleta viciada em relação ao sorteio aleatório para todos os cenários que não possuem critério de vizinhança pode ser observada nos gráficos das Figuras 30 e 31.

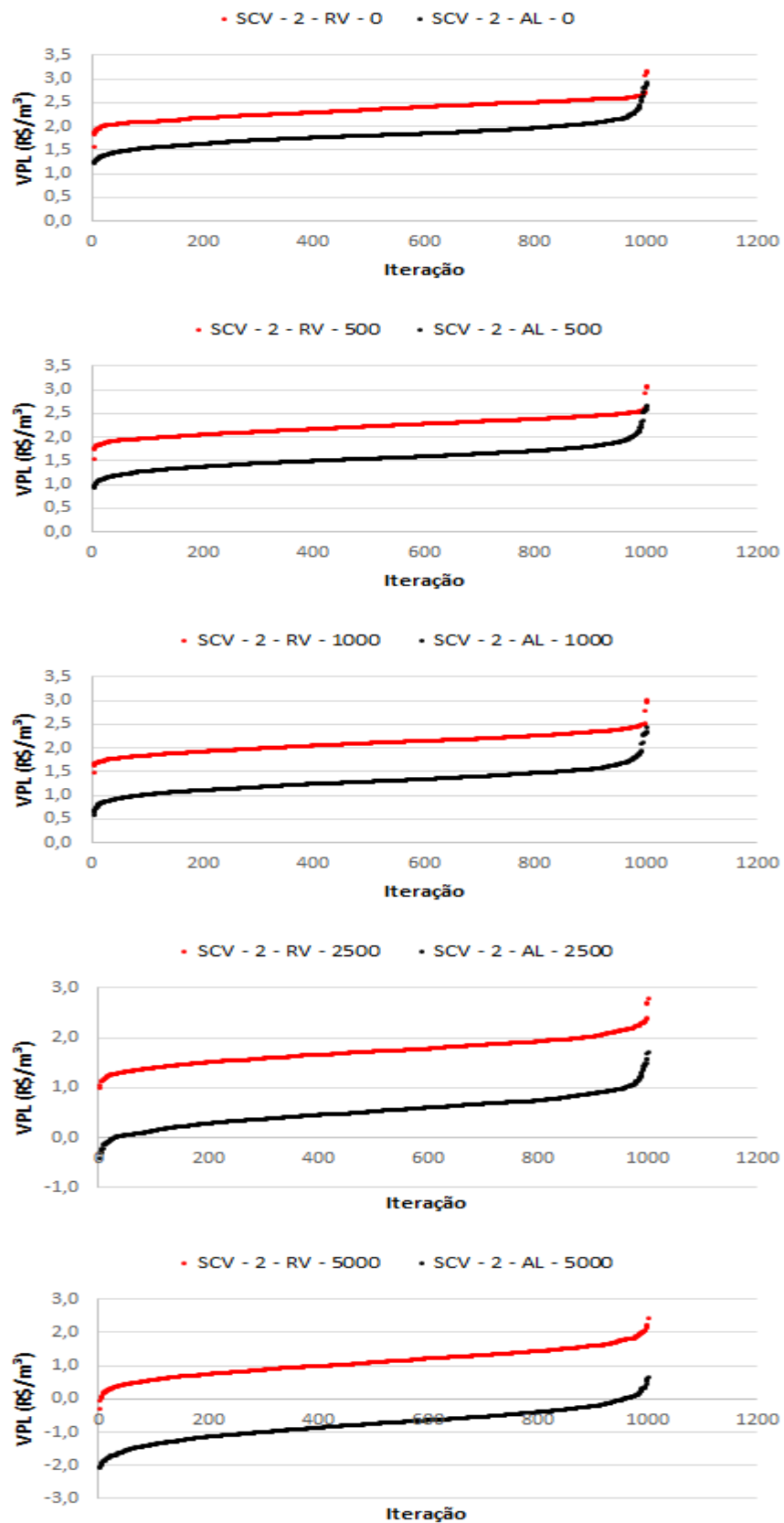
As correlações entre o VPL e a distância percorrida pelas máquinas de colheita, para diferentes custos de deslocamento e regra de sorteio, são apresentadas na Tabela 21. Observa-se que a correlação diminui quando o custo de deslocamento da colheita aumenta, sendo que a roleta viciada apresentou valores sempre menores em relação ao sorteio aleatório.

Figura 30 – Resultados do VPL sem critério de vizinhança (SCV), roleta viciada e diferentes custos de deslocamento da colheita (R\$/m³).



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 31 – Resultado do sorteio aleatório e roleta viciada para cada custo de deslocamento da colheita.



Fonte: dados da pesquisa.

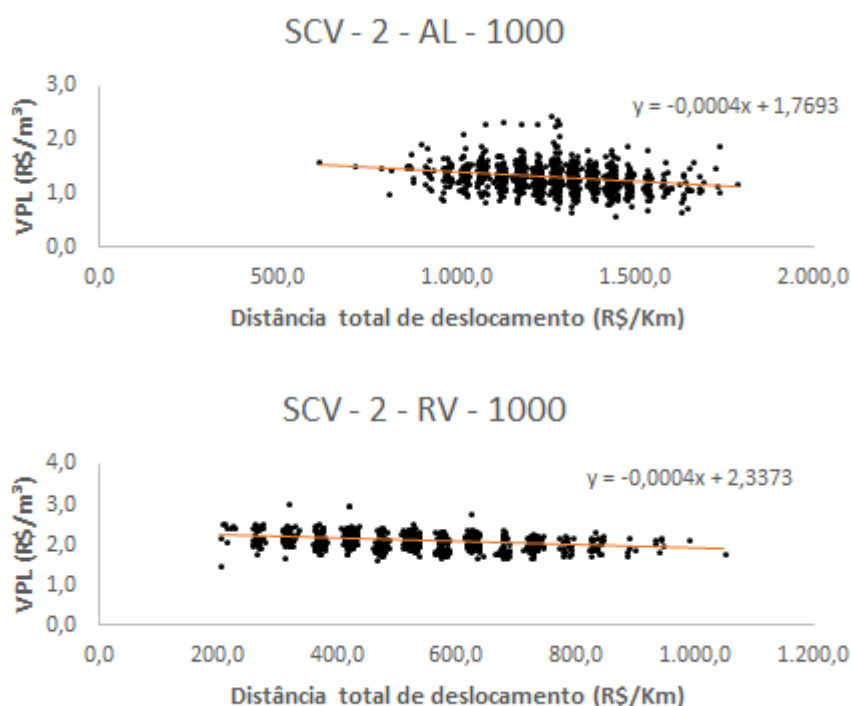
Tabela 21 – Correlação entre o lucro e a distância percorrida pelas máquinas de colheita para diferentes custos de deslocamento.

Custo de Deslocamento da Colheita (R\$/km)	Correlação	
	Aleatório	Roleta Viciada
0,0	0,0547	0,0518
500,0	-0,1109	-0,1482
1.000,0	-0,2665	-0,3331
2.500,0	-0,5940	-0,6944
5.000,0	-0,7965	-0,8887

Fonte: dados da pesquisa.

A Figura 32 apresenta o gráfico de dispersão entre o VPL e a distância percorrida para um custo de deslocamento da colheita igual a R\$/km 1.000,0. Essa figura mostra que a iteração que obteve o maior lucro não é a que apresenta o menor deslocamento. Isso também ocorreu para todos os cenários de 21 a 30.

Figura 32 – Dispersões entre o VPL a distância percorrida pelas máquinas de colheita para os sorteios aleatório e roleta viciada.

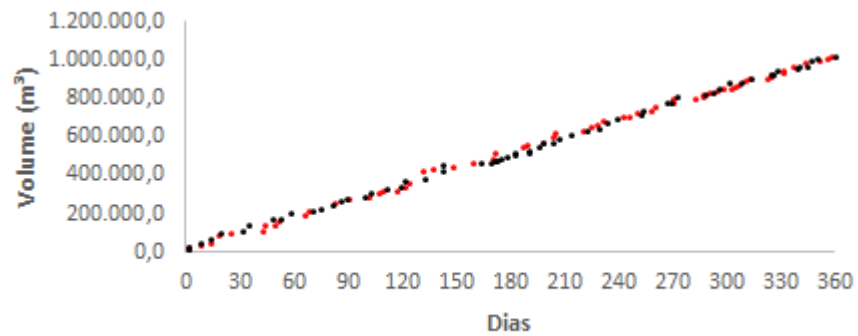


Fonte: dados da pesquisa.

A Figura 33 plota o volume de madeira acumulado ao longo do tempo para as iterações de maior (preto) e menor (vermelho) VPL, apresentaram um fornecimento periódico de forma

regulada ao longo de um ano, pois todos os cenários de 11 a 20 apontam o mesmo comportamento de fornecimento periódico e global de madeira.

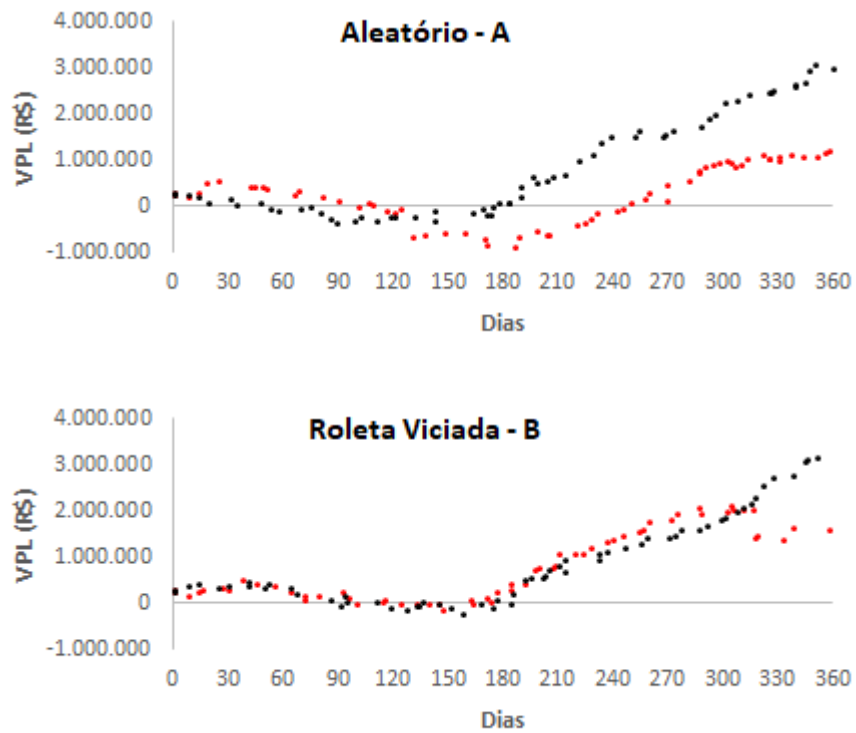
Figura 33 – Volume acumulado de madeira colhida ao longo de um ano para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento e sorteio aleatório.



Fonte: dados da pesquisa.

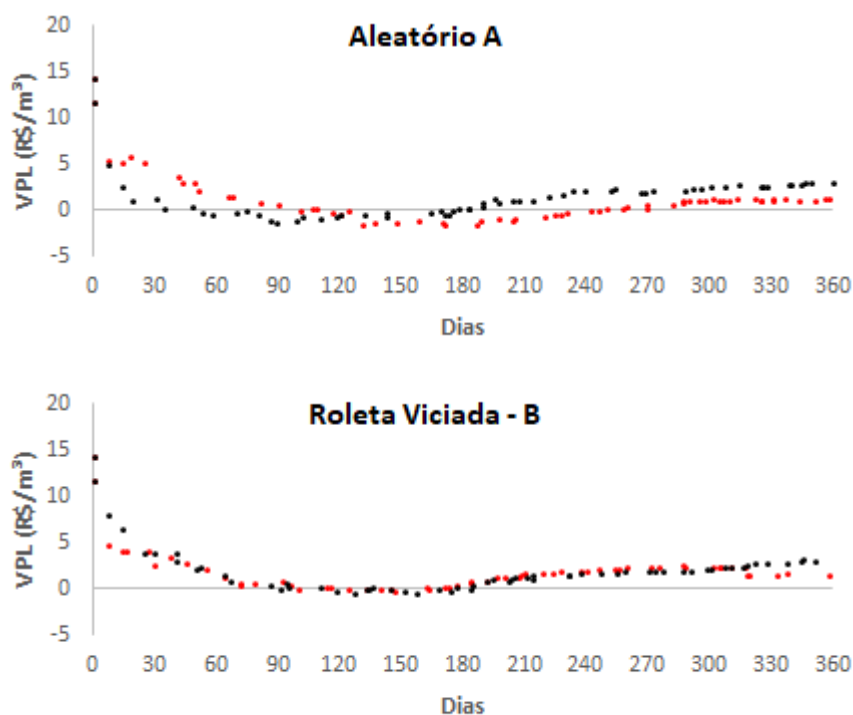
Os gráficos das Figuras 34 e 35 mostram superioridade da roleta viciada em comparação ao sorteio aleatório, pois apresenta fluxo de caixa acumulado mais satisfatório. Além disso, roleta viciada apresenta valores mais próximos entre a melhor e a pior solução. Todos os cenários sem critério de vizinhança também apresentaram comportamento semelhante.

Figura 34 - Comportamento do VPL (R\$) acumulado ao longo do tempo (dias) para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento da colheita, com sorteio aleatório (A) e roleta viciada (B)



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 35 – Comportamento do VPL (R\$/m³) ao longo do tempo (dias) para a melhor (preto) e pior (vermelho) solução, sem custo de deslocamento da colheita, com sorteio aleatório (A) e roleta viciada (B).



Fonte: dados da pesquisa.

As Tabelas 22, 23, 24 e 25 foram geradas utilizando os dados da melhor e da pior solução obtida dentre as 1.000 iterações do cenário 3 (SCV – RV – 1000). A sequência de corte das unidades de manejo para as duas frente de colheita se encontra na Tabela 22. A Tabela 23 mostra o dia em que cada unidade de manejo será colhida. O lucro ou prejuízo por unidade de manejo na data da colheita é apresentado na Tabela 24. A idade ótima de corte das unidades de manejo se encontra na Tabela 25.

Tabela 22 – Sequência de corte por frente de colheita (0 e 1).

1 - 27	1 - 31	1 - 30	1 - 29	0 - 28	0 - 14	0 - 15	0 - 17	0 - 16	0 - 18
0 - 13	0 - 19	0 - 12	0 - 29	0 - 1	0 - 30				0 - 11
1 - 7	1 - 6	1 - 5	1 - 4	0 - 2	1 - 12				
1 - 8	1 - 10	1 - 2	1 - 11	0 - 5	0 - 6	0 - 7	0 - 8	0 - 9	0 - 10
1 - 9	1 - 3	1 - 1	0 - 3	0 - 4	0 - 25	0 - 27	0 - 24	1 - 28	0 - 26
1 - 20	0 - 21	0 - 22	0 - 20	0 - 23	1 - 22	1 - 23	1 - 24	1 - 25	1 - 26
1 - 19	1 - 16	1 - 15	1 - 14	1 - 13					
1 - 18	1 - 17								
	1 - 21								
		1 - 32							
	0 - 22	0 - 30	0 - 27	1 - 26		1 - 15	0 - 15	0 - 13	0 - 25
1 - 16		1 - 14		0 - 1					0 - 6
1 - 13	1 - 5	1 - 3	1 - 10	0 - 7	0 - 3				
1 - 7	1 - 12	1 - 2	1 - 9	0 - 11	1 - 17	0 - 4	0 - 12	1 - 8	1 - 6
1 - 30	0 - 5	1 - 1	0 - 8	1 - 11	1 - 23	0 - 17		1 - 21	0 - 18
1 - 24	1 - 25	0 - 14	0 - 20	1 - 22	0 - 23	0 - 21		0 - 19	1 - 28
0 - 16	0 - 2	1 - 20	0 - 9	1 - 4					
1 - 27	1 - 18							1 - 19	
	0 - 10					0 - 26	0 - 24	0 - 28	1 - 29
						0 - 29			

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 23 – Dia da colheita do horizonte de planejamento para cada unidade de manejo.

316	349	337	330	337	174	185	195	187	199
169	205	161	344	1	363				139
82	69	58	41	14	141				
104	112	8	120	52	69	78	95	119	123
110	16	1	30	41	284	318	274	321	308
229	226	242	212	259	263	276	291	294	308
224	188	177	165	149					
212	205								
	245								
		357							
	306	357	342	324		171	225	199	332
173		163		1					80
141	43	16	105	102	30				
72	133	8	83	158	178	38	175	79	56
365	55	1	118	122	270	233		245	252
294	309	208	276	255	314	291		262	342
229	14	234	129	27					
331	187							194	
	140					337	326	349	351
						351			

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 24 – VPL (R\$/m³) para cada unidade de manejo na data da colheita.

4,7	7,3	7,8	8,8	5,9	18,4	18,9	18,7	16,9	16,5
17,6	16,8	19,2	10,0	14,3	11,6				0,2
2,7	6,3	3,8	2,9	2,9	-3,9				
-7,3	-11,5	-11,3	-2,5	-2,9	-4,0	-1,6	-2,9	-17,1	-6,4
7,1	6,8	6,1	4,2	4,2	8,3	10,2	8,1	9,9	7,7
-0,2	3,5	2,2	-0,5	5,8	5,4	5,8	6,7	5,8	6,3
1,3	-4,7	-6,1	-4,1	-4,4					
-0,1	3,6								
	-4,3								
		0,8							
	4,1	6,0	5,8	2,3		18,6	11,6	16,8	12,6
17,4		19,4		14,3					0,1
2,7	4,7	3,8	3,0	2,9	-7,3				
-7,3	-11,5	-11,3	-2,5	-3,2	-4,1	-1,6	-3,0	-17,1	-6,3
-2,5	6,8	6,1	4,2	4,2	7,3	9,1		7,9	7,7
-1,4	3,6	0,9	1,2	4,6	3,9	5,8		4,4	6,1
-4,1	-4,8	-6,1	-4,4	-4,3					
-1,6	0,7							-9,9	
	-4,2					-14,0	-0,2	-31,5	-3,1
						-9,5			

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 25 – Idade (anos) da florestal quando foi colhida.

6,1	6,2	6,1	6,1	6,1	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1
6,0	6,1	6,0	6,0	5,0	6,0				7,8
7,6	7,6	7,7	7,5	7,4	7,9				
23,0	23,1	22,8	23,1	22,9	22,9	23,0	23,0	23,1	23,1
7,5	7,3	7,2	7,3	7,4	6,1	6,3	6,1	6,3	6,2
6,1	6,1	6,1	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
6,0	21,2	21,3	21,2	21,2					
6,2	6,2								
	26,9								
		6,1							
	6,1	6,2	6,1	6,1		6,0	6,2	6,1	6,5
6,0		6,0		5,0					7,7
7,8	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6				
22,9	23,1	22,8	23,0	23,2	23,2	22,9	23,2	23,0	22,9
8,2	7,4	7,2	7,6	7,6	6,0	6,1		6,1	6,1
6,3	6,3	6,0	6,2	6,1	6,2	6,2		6,1	6,2
6,0	20,7	21,4	21,1	20,9					
6,6	6,1							30,3	
	26,6					6,1	6,1	6,1	6,0
						6,1			

Fonte: dados da pesquisa.

A Tabela 26 lista a representatividade dos custos, do lucro e da receita obtida pelo incremento da corrente do volume durante o horizonte de planejamento (um ano). A representatividade foi calculada de forma percentual, utilizando a receita total como denominador. Todos os valores utilizados para calcular o custo e a receita foram corrigidos com taxa de desconto de 10% ao ano.

Ao analisar a diferença entre a melhor e a pior solução dos cenários 21 a 30 (Tabela 26), observa-se que:

- O custo de formação florestal foi o que mais influenciou na lucratividade para as duas regras de sorteio com custo menor ou igual a R\$ 1.000,00/km;
- O custo de deslocamento foi o que mais influenciou na lucratividade para as duas regras de sorteio com custo maior ou igual a R\$ 2.500,00/km; e
- O incremento corrente durante o período de planejamento foi maior para as melhores soluções em todos os casos do sorteio aleatório e na maioria dos casos de estudo com roleta viciada.

Tabela 26 – Representatividade dos custos, do lucro e da receita obtida pelo incremento corrente desde a primeira até a última unidade de manejo a ser colhida durante o período de um ano.

Vizinhança	Evolução	Custo de Deslocamento (R\$/Km)	Solução	Custo de Formação (%)	Custo de Colheita (%)	Custo de Transporte (%)	Custo de Deslocamento (%)	Custo Madeira Posto Fábrica (%)	Receita Incremento Corrente (%)	Receita (%)	VPL (%)
SCV	AL	0	Melhor	31,17	27,67	33,09	0,00	91,94	9,56	100,00	8,06
SCV	AL	0	Pior	34,32	27,65	34,38	0,00	96,35	9,22	100,00	3,65
Diferença				-3,15	0,02	-1,29	0,00	-4,42	0,34	0,00	4,42
SCV	AL	500	Melhor	31,12	27,67	33,24	0,65	92,68	9,87	100,00	7,32
SCV	AL	500	Pior	34,45	27,92	33,88	0,99	97,24	9,40	100,00	2,76
Diferença				-3,33	-0,25	-0,65	-0,34	-4,56	0,47	0,00	4,56
SCV	AL	1000	Melhor	31,12	27,67	33,24	1,30	93,33	9,87	100,00	6,67
SCV	AL	1000	Pior	34,45	27,92	33,88	1,98	98,23	9,40	100,00	1,77
Diferença				-3,33	-0,25	-0,65	-0,67	-4,90	0,47	0,00	4,90
SCV	AL	2500	Melhor	31,12	27,67	33,24	3,26	95,29	9,87	100,00	4,71
SCV	AL	2500	Pior	34,45	27,92	33,88	4,94	101,19	9,40	100,00	-1,19
Diferença				-3,33	-0,25	-0,65	-1,68	-5,90	0,47	0,00	5,90
SCV	AL	5000	Melhor	31,25	27,73	33,56	5,67	98,20	9,48	100,00	1,80
SCV	AL	5000	Pior	34,45	27,92	33,88	9,88	106,13	9,40	100,00	-6,13
Diferença				-3,20	-0,19	-0,32	-4,22	-7,93	0,09	0,00	7,93
SCV	RV	0	Melhor	30,75	27,64	32,98	0,00	91,37	9,67	100,00	8,63
SCV	RV	0	Pior	33,66	27,74	33,95	0,00	95,35	8,87	100,00	4,65
Diferença				-2,91	-0,11	-0,97	0,00	-3,99	0,80	0,00	3,99
SCV	RV	500	Melhor	30,81	27,64	32,91	0,20	91,56	9,49	100,00	8,44
SCV	RV	500	Pior	33,66	27,74	33,95	0,12	95,47	8,87	100,00	4,53
Diferença				-2,85	-0,10	-1,03	0,08	-3,91	0,62	0,00	3,91
SCV	RV	1000	Melhor	30,81	27,64	32,91	0,40	91,76	9,49	100,00	8,24
SCV	RV	1000	Pior	33,66	27,74	33,95	0,25	95,60	8,87	100,00	4,40
Diferença				-2,85	-0,10	-1,03	0,15	-3,84	0,62	0,00	3,84
SCV	RV	2500	Melhor	30,81	27,64	32,91	1,00	92,36	9,49	100,00	7,64
SCV	RV	2500	Pior	32,48	27,80	33,33	3,60	97,22	9,74	100,00	2,78
Diferença				-1,67	-0,16	-0,42	-2,60	-4,85	-0,24	0,00	4,85
SCV	RV	5000	Melhor	30,81	27,64	32,91	2,00	93,36	9,49	100,00	6,64
SCV	RV	5000	Pior	32,48	27,80	33,33	7,20	100,82	9,74	100,00	-0,82
Diferença				-1,67	-0,16	-0,42	-5,20	-7,46	-0,24	0,00	7,46

Fonte: Dados da pesquisa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atividades de colheita e transporte da madeira até o pátio possuem uma representatividade de 60 a 70% do custo total da madeira posto fábrica (ANDRADE, 1998; MALINOVSKI et al., 2008). Os resultados neste estudo ficaram dentro destes limites. Empresas florestais possuem diversas fazendas subdivididas em unidades de manejo com diferentes características.

Cada solução se diferencia pela distribuição espacial e temporal, que por sua vez influencia na gestão da mão de obra, máquinas de colheita e de transporte. Atender ao objetivo de forma ótima significa que a equipe de gestão deve atingir as metas estabelecidas pelo planejamento otimizado, pois a melhor solução gera uma sequência de colheita e transporte que culmina em um atendimento da demanda com máximo retorno financeiro ao respeitar as restrições técnicas, ambientais, sociais.

O planejamento operacional trata a tomada de decisão em curto prazo, que normalmente considera um horizonte anual subdividido em períodos mensais, semanais e, ou, diários. Neste nível de planejamento toma-se decisões sobre a definição dos produtos, alocação da mão de obra e máquinas, período em que cada unidade de manejo será colhida e gerenciamento do transporte da madeira a destinos intermediários e finais, buscando atender a demanda de forma regular.

Na maioria das vezes, os estudos e sistemas de planejamento de longo prazo fazem uso da programação linear, inteira ou inteira mista, considerando uma quantidade de unidades de manejo ou área total a ser colhida para um horizonte de planejamento distribuído em períodos anuais. Assim, muitas vezes apenas informam quais talhões devem ser cortados em um período anual, mas não informam a quantidade de frentes de colheita e a sequência de corte para cada unidade de manejo durante o período de planejamento. Além disso, esses sistemas não informam quais unidades de manejo que cada frente de colheita deve ser endereçada. Por isso, a metodologia deste estudo foi elaborada, pois ela permite realizar o agendamento da colheita para as unidades de manejo selecionadas para cortar em um período anual.

A maioria dos estudos de planejamento florestal otimizado, com restrições máximas ou mínimas de agrupamento das unidades de manejo, também não informa a data de início e término da colheita para cada unidade de manejo e frente de colheita.

Na elaboração do planejamento operacional, em empresas, são utilizadas planilhas eletrônicas, praticamente sem a presença de técnica de pesquisa operacional. Isso ocorre porque cada empresa tem suas particularidades em termos da característica do local, do povoamento florestal, política e gestão empresarial, afinidade com determinada metodologia, dentre outras.

O sistema desenvolvido neste estudo (*Harvest Scheduling System*) é capaz de determinar o sequenciamento, a quantidade, e o endereçamento para cada frentes de colheita, com objetivo de maximizar o lucro e atender a demanda durante um horizonte temporal de um ano. Assim, o gestor florestal será capaz de planejar de forma mais eficaz e eficiente a alocação de máquinas e mão de obra diariamente.

Na programação linear, quando o número de combinações aumenta, o tempo de processamento aumenta em escala exponencial. Na solução proposta essa relação é linear, sendo uma grande vantagem.

Quanto maior a quantidade de informação (big data) a ser modelada, maior a capacidade de um conjunto de critérios e regras simples aproximar a modelagem com autômato celular a problemas reais. No entanto, o aumento na quantidade de variáveis e restrições eleva o tempo de processamento e a complexidade na idealização dos critérios e regras. Assim, deve buscar especialistas capacitados em modelagem e implementação de rotinas computacionais para que somente as informações intrínsecas ao problema sejam coletadas.

Uma qualidade na rotina implementada neste trabalho é a velocidade de processamento para gerar uma nova decisão. O HSS demanda cerca de 30 segundos para processar 1.000 iterações em uma base florestal contendo 100 unidades de manejo a serem colhidas com duas frentes de colheita para um horizonte de planejamento anual. Além disso, as entradas do sistema são de fácil obtenção e a configuração é bastante simples. Sendo assim, sempre que ocorrer alguma adversidade na rotina operacional como precipitação ou problemas mecânicos, até mesmo o supervisor de campo é capaz de processar uma nova solução otimizada que possibilite atender as necessidades de mudança no planejamento de forma praticamente imediata.

A tendência de diminuição da distância percorrida pelas máquinas, em função do aumento no custo de deslocamento da colheita, não garante que a melhor solução de maximização do lucro será a que apresentar a menor distância percorrida. Isto indica que postergar a colheita para unidades de manejo próximas da frente de colheita ou antecipá-la para unidades mais distantes pode gerar um ganho financeiro suficiente para pagar o deslocamento e obter um maior lucro.

Na busca contínua de melhoria do sistema, pode ser utilizado o *ArcGis Runtime SDK* (*Software Development Kit for Java*) para embutir no sistema o mapa da área florestal e funcionalidades que utilizam referência espacial. A modelagem atual considera a unidade de manejo como ponto de um grafo que armazena as tabelas de atributo.

Outra questão interessante no desenvolvimento de sistemas com autômatos celulares é a possibilidade de estabelecer regras simples que se comportam de forma parecida com uma

metaheurística específica para o problema que se busca solucionar. Por exemplo: diferentes estados iniciais geram soluções distintas, portanto pode-se implementar uma rotina que sorteia o local de cada frente de colheita em cada iteração. O problema de atendimento máximo e mínimo pode ser tratado ao simular diferentes quantidades de frentes de colheita em cada iteração.

A base florestal utilizada neste estudo possuía quase 17 % da área com unidades de manejo apresentando idade maior ou igual a 10 anos, sendo esse o motivo de geração do fluxo de caixa negativo em alguns momentos do horizonte de planejamento.

Dentre os estudos de caso formulados, aqueles que apresentavam a regra do sorteio aleatório e oito vizinhos geraram os melhores resultados para quase todos os cenários simulados. Sendo que o critério de oito vizinhos foi superior ao sorteio aleatório. Em nenhum dos cenários a melhor solução obtida foi a que tivesse a menor distância percorrida pelas máquinas de colheita. Assim, o estudo mostra que o raciocínio lógico de realizar a sequência de corte para a unidade de manejo mais próxima para evitar o deslocamento de máquinas não maximiza o lucro.

Embora o HSS tenha se mostrado eficiente para resolver o problema de curto prazo, algumas possíveis melhorias foram visualizadas ao término deste estudo:

- Implementar o *ArcGis Runtime SDK (Software Development Kit) for Java*;
- Automatizar a busca da quantidade ideal de frentes de colheita;
- Automatizar a escolha da(s) unidade(s) de manejo do estado inicial a partir da melhor solução;
- Considerar diferentes produtividades de colheita para diferentes épocas do ano e modais de colheita;
- Implementar interface para plotar gráficos apresentados neste estudo que dão suporte a tomada de decisão; e
- Sortear possíveis prescrições após a colheita de cada unidade de manejo para transformar o HSS em um sistema de planejamento de médio e longo prazo.

7 CONCLUSÃO

A aplicação de critérios e regras simples aos autômatos celulares para o planejamento florestal de curto prazo é capaz de otimizar o agendamento da colheita e maximizar o lucro para períodos anuais, mensais e diários.

O sistema desenvolvido, *Harvest Scheduling System* (HSS), permite simular cenários de atendimento na demanda por madeira e produz resultados otimizados para o agendamento da colheita em tempo hábil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C. A. J. **Um sistema multiagente para otimização do transporte florestal**. 2016. 72 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

EPSTEIN, J. M.; AXTELL, R. (1996) *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. MIT Press, Cambridge, MA.

BANHARA, J. R. **Agendamento otimizado das atividades de colheita de madeira em plantios de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e de risco climático. Piracicaba**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2009.

BASKENT, E. Z.; JORDAN, G. A. Characterising spatial structure of forest landscape. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 25, p. 1830-1849, 1995.

BINOTI, D. H. B. **Regulatory strategies for even-aged forest with views of the landscape management**. 2010. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BINOTI, D. H. B. **Computer systems applied to forest management**. 2012. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BOSTON, K.; BETTINGER, P. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States. **Forest Ecology and Management**, Netherlands, v. 145, n. 3, p. 191-202, 2001.

BUONGIORNO, J.; GILLES, J. K. **Decision methods for forest resource management**. San Diego: Academic, 2003. 439 p.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: Editora UFV, 2017. 636 p.

CASTRO, R. R. **Regulação de florestas equiâneas incluindo restrições de adjacência**. 2007. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CHURCH, A. An unsolvable problem of elementary number theory. **American Journal of Mathematics**, v. 58, p. 345–363, 1936a.

CHURCH, A. A Note on the Entscheidungsproblem. **Journal of Symbolic Logic**, v. 1, p. 40-41, 1936b.

DARGAVEL, J. B.; BETHUNE J. E. Operations research in forestry-woodlands divisions Edge into scientific management planning. **Journal of Forestry**, v. 70, n. 9, p. 552-555, September 1972.

DAVIS, K. P. **Forest management: regulation and valuation**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1966. 519 p.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N.; BETTINGER, P.; HOWARD, T. E. **Forest management: to sustain ecological, economic, and social values.** New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2005. p. 804.

FEUNEKS, U., COGSWELL, A. A hierarchical approach to spatial forest planning. USDA Forest Service, General Technical Report NC 7-13, 2000.

GADOW, K. V.; PUKKALA, T. (Ed.). **Designing green landscapes.** Vol. 15, Springer series Managing. Forest Ecosystems, 2008.

GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". **Scientific American**, v.223, p. 120-123, 1970.

GERHARDT, M.; SCHUSTER, H. A cellular automaton describing the formation of spatially ordered structures in chemical systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 36, n. 3, p. 209-221, 1989.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Comparison the metaheuristic simulated annealing and integer linear programming for solving the forest harvest scheduling with adjacency constraints. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 449-460, jun. 2013.

HEINONEN, T.; PUKKALA, T. The use of cellular automaton approach in forest planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, p. 2188-2200, 2007.

IVERSON, D. C.; ALSTON, R. M. **The genesis of FORPLAN: A historical and analytical review of Forest Service planning models.** Washington: USDA Forest Service, 1986. 25 p. (General Technical Report, INT-214).

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives – Discussion and Synthesis. **Forest Sciences, Monograph**, Washington, v. 18, p. 1-31, 1977.

JOHNSON, K. N. **FORPLAN version 1: An overview.** Land management planning systems section, USDA Forest Service, Fort Collins, Colo, 1986.

JOHNSON, K. N.; CRIM, S. A. FORPLAN version 1: Structures and options guide. Colo: Land Management Planning Systems Section, USDA Forest Service, Fort Collins, 197 p. Plus apêndices, 1986.

JOHNSON, K. N.; STUART, T. W.; CRIM, S. A. **FORPLAN version 2: An overview.** Colo: Land Management Planning Systems Section, USDA Forest Service, Fort Collins, 1986.

JORGENSEN, S. E. **Editorial: 25 years of ecological modelling by Ecological Modelling.** **Ecological Modelling**, v. 126, n. 2/3, p. 95-99, 2000.

LEITE, E. S. **Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas.** 2012. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

LEUSCHNER, W. A. **Forest regulation, harvest scheduling and planning techniques.** New York: John Wiley, 1990. 281 p.

MOREIRA, J. M. M. A. P. **A incorporação de corredores de conectividade em problemas de otimização para o planejamento de florestas industriais**. 2008. 123 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2008.

NAVON, D. I. **Timber RAM ... a long-range planning method for commercial timber lands under multiple-use management**. Berkeley: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1971. 22 p. (USDA. Forest Service, Res. paper PNW - 70)

NEUMANN, J. V.; BURKS, A. W. **Theory of self-reproducing automata**. Urbana and London: University of Illinois Press, 1966.

ÖHMAN, K.; ERIKSSON, L. O. Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. **Forest Ecology and Management**, v. 161, n. 1-3, p. 221-230, 15 May 2002,

OpTimber-LP (Disponível em: <www.optimber.com.br>).

PUKKALA, T. Introduction to multi-objective forest planning. In: PUKKALA, T. (Ed.). **Multiobjective forest planning**: 1-19. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

PUKKALA T.; HEINONEN T. Optimizing heuristic search in forest planning. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, v. 7, p. 1284-1297, 2006.

REMSOFT. Disponível em: <www.remsoft.com>.

RODRIGUES, F. L. **Regulação de florestas equiâneas utilizando programação linear**. 1997. 109 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 225 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.

RODRIGUES, F. A. **Inclusão das dimensões social e ecológica em planos de manejo para florestas de rápido crescimento**. 2002. 110 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2002.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L. Soluções de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando busca tabu. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 5, p. 701-713, 2003.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 2, p. 247-256, 2004a.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; SOUZA, A.L.; SILVA G. F. Metaheurística algoritmo genetic para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 22, n. 2, p. 233-245, 2004b.

RODRIGUES, F. L.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Um modelo de regulação florestal e suas implicações na formulação e solução de problemas com restrições de recobrimento. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 769-778, 2006.

SESSIONS, J.; BETTINGER, P.; MURPHY, G. Heuristics in forest planning. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, R.; MIRANDA, J. (Ed.). **Handbook of operations research in natural resources**. Springer, US, p. 431-448, 2007.

SifPlan (Disponível em: <www.treesoftware.com.br>)

SYPHARD, A.; CLARKE, K. C.; FRANKLIN, J. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in outhern California. In: **Ecological Complexity**, n 2, 185–203, 2005.

TAUBE NETTO, M. Um modelo de programação linear para planejamento de florestas de eucalipto. **Pesquisa Operacional**, v. 4, n. 1, p. 19-39, 1984.

TURING, A. M. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. In: PROCEEDINGS OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY (Series 2), v. 42 (1936–37): p. 230-265, 1936.

WARE, G. O.; CLUTTER, J. L. A mathematical programming system for the management of industrial forests. **Forest Science**, v. 17, n. 3, p. 428-445, 1971.

WEINTRAUB, A.; CHOLAKY, A. A Hierarchical approach to forest planning. **Forest Science**, v. 37, p. 439-460, 1991.

WEINTRAUB, A.; MURRAY, A. T.; GUIGNARD M.; CHURCH R. L. Forest management models and combinatorial algorithms: Analysis of state of the art. In: ANNALS OF OPERATIONS RESEARCH, 2000, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio, 2000. p. 271-285.

WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEINJAIME, R.; MIRANDA, J. **Handbook of operations research in natural resources**. With the collaboration of Jaime Miranda. Editora Springer, Boston, MA, 2007. 624 p.

WERNEBURG, M. A. P. **Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil**. 2015. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2015.

WOLFRAM, S. **A new kind of science**. Wolfram Media, Inc, 2002.