

MARIANA FUTIA TAQUETTI

OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS EM PROJETOS SILVICULTURAIS

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*.

Orientador: José Marinaldo Gleriani

Coorientador: Helio Garcia Leite

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

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

T

T175o
2021 Taquetti, Mariana Futia, 1990-
Otimização de recursos em projetos silviculturais / Mariana
Futia Taquetti. – Viçosa, MG, 2021.
1 tese eletrônica (79 f.): il. (algumas color.).

Orientador: José Marinaldo Gleriani.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2021.
Inclui bibliografia.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.098>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Programação linear inteira. 2. Algoritmos genéticos.
3. Otimização da mão-de-obra. I. Gleriani, José Marinaldo,
1966-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência
Florestal. III. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.9684

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

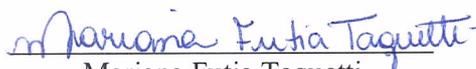
MARIANA FUTIA TAQUETTI

OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS EM PROJETOS SILVICULTURAIS

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: 17 de dezembro de 2021.

Assentimento:



Mariana Futia Taquetti

Autora



José Marinaldo Gleriani

Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter saúde e força em meio à pandemia, enquanto o mundo todo sofria com milhares de mortes e incertezas.

Agradeço o apoio da minha família - minha mãe, meu pai, Silvia e Murilo – por entenderem minha ausência durante os períodos mais difíceis.

Agradeço aos professores e funcionários do DEF-UFV por todos esses anos de convivência e parceria, principalmente ao Professor Helio por me acompanhar desde a graduação, pela orientação, pelo seu tempo e dedicação, por todas as oportunidades de crescimento em que me apoiou. Ao Professor Marinaldo, por aceitar o desafio, por ser compreensivo e sempre disponível a ajudar em qualquer situação. Ao Daniel Binoti por todos os momentos em que precisei e fui imediatamente atendida, por me ajudar em toda a parte do *script* do trabalho, foi imprescindível para este trabalho acontecer. Ao Professor Márcio e à Aline Mazon por fazerem parte deste trabalho, contribuindo com seus conhecimentos e experiências. Ao Alexandre e Dilson, sempre disponíveis e dispostos a ajudar, disponibilizando recursos para que o trabalho pudesse ser feito.

Agradeço também ao meu colega Lucas, nessa reta final esteve disponível para discussões a respeito do tema, foi de grande importância.

Agradeço aos meus amigos presentes durante toda essa jornada, participando dos melhores momentos e dos nem tão bons assim, Amana, Vicente, Maria Tereza, Thata, Jéssica, Larissa, Jéssica e Matheus.

A vida só faz sentido quando compartilhamos com as pessoas que amamos.

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

“Sei o que devo ser e ainda não sou,
mas rendo graças a Deus por estar trabalhando,
embora que lentamente, por dentro de mim próprio,
para chegar, um dia, a ser o que devo ser.”
Chico Xavier

RESUMO

TAQUETTI, Mariana Futia, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2021. **Otimização de recursos em projetos silviculturais**. Orientador: José Marinaldo Gleriani. Coorientador: Helio Garcia Leite.

Devido à importância da mão-de-obra no custo da implantação e manutenção de povoamentos florestais, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na alocação otimizada dessa mão-de-obra é essencial para o planejamento florestal, para a tomada de decisão e para o alcance de metas de produtividade. A programação de projetos silviculturais considerando a regulação da mão-de-obra representa uma oportunidade em meio a diversos benefícios da regulação, como a uniformidade da distribuição do trabalho, redução do tempo total do projeto, organização do trabalho e redução de custos. Tendo em vista esses benefícios, este trabalho utilizou algoritmo genético e programação linear inteira, a fim de resolver um problema de restrição de recursos, neste caso a mão-de-obra, na programação do sequenciamento das atividades em plantios de eucalipto. Tanto o algoritmo genético quanto a programação inteira resolveram o problema, porém alguns ajustes de sequenciamento de atividades e duração das atividades devem ser realizados para alinhamento com o planejamento operacional praticado nas empresas.

Palavras-chave: Programação linear inteira. Algoritmo genético. Otimização da mão-de-obra.

ABSTRACT

TAQUETTI, Mariana Futia, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2021. **Resources optimization in silvicultural project.** Adviser: José Marinaldo Gleriani. Co-adviser: Helio Garcia Leite.

Due to the importance of manpower in the cost of implantation and maintenance of forest stands, the development of tools that help in the optimized allocation of this labor is essential for forest planning, decision-making and reach of productivity goals. The scheduling of silvicultural projects considering the manpower regulation represents an opportunity amidst several benefits of regulation, such as uniformity of work distribution, reduction of total project time, work organization and cost reduction. In view of these benefits, this work used genetic algorithm and integer linear programming in order to solve a resource restriction problem, in this case, manpower, for scheduling of the silvicultural activities sequencing in eucalyptus plantations. Both the genetic algorithm and the integer linear programming solved the problem, but some adjustments to the sequencing of activities and activities duration must be carried out to align with the operational planning practiced in the companies.

Keywords: Integer linear programming. Genetic algorithm. Manpower optimization.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
OBJETIVOS	11
CAPÍTULO I	12
PROJETOS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS E SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES	12
INTRODUÇÃO	12
PLANEJAMENTO OPERACIONAL	13
A REGULAÇÃO DA MÃO-DE-OBRA PARA REDUÇÃO DO TEMPO DO PROJETO	16
GERENCIAMENTO DE PROJETOS SILVICULTURAIS	17
METAHEURÍSTICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO FLORESTAL	21
ALGORITMOS GENÉTICOS	24
População	26
Função <i>Fitness</i>	27
Processos evolucionários, seleção, recombinação e mutação	27
Critério de parada	29
PROGRAMAÇÃO LINEAR E LINEAR INTEIRA NA OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
CAPÍTULO II.....	41
APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO NO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS E TAREFAS	41
INTRODUÇÃO	41
MATERIAL E MÉTODOS	42
Descrição do problema	43
Pressupostos	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
Modelo	46
Função de aptidão (<i>fitness</i>).....	46
Restrição de trabalhador	46
Restrição de área	47

Restrição binária.....	47
ABSTRACT	
CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
CAPÍTULO III	67
APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA NO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS E TAREFAS.....	67
INTRODUÇÃO	67
MATERIAL E MÉTODOS	68
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
Modelo	70
Restrição por trabalhador	70
Restrição por atividade.....	70
Limites de tolerância para as áreas de cada talhão	70
Restrição de sequenciamento	71
Restrição binária.....	71
CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

INTRODUÇÃO

No Brasil existem atualmente cerca de 9,6 milhões de hectares de florestas plantadas, 7,4 milhões de hectares são plantios de eucalipto destinados a fins comerciais (IBGE, 2020). A região sudeste possui a maior área de florestas plantadas do país, com 3,6 milhões de hectares (37,2%), e predomínio de plantios de eucalipto, enquanto a região sul possui 3,1 milhões de hectares (32,6%), com maior concentração de plantios de pinus (IBGE, 2020). Os produtos madeireiros seguem predominantes no setor, representando 90,1% do valor da produção florestal e há uma tendência de ampliação da área de silvicultura nos últimos anos (IBGE, 2020).

A gestão dos recursos florestais conta com o apoio de planos de manejo florestal, desenvolvidos para facilitar os conflitos e para organizar o tempo e a sequência de atividades de manejo florestal (BETTINGER et al., 2015).

Os métodos usados para desenvolver esses planos variam de formulação e desenvolvimento de problemas matemáticos, resolvidos frequentemente com algoritmos de programação inteira linear ou mista e cada vez mais com heurísticas (BETTINGER et al., 2015). Conhecer bem os processos envolvidos, desde a implantação até a comercialização do produto (ou produtos) da floresta, permite identificar oportunidades de melhorias e otimizar recursos considerados escassos e essenciais para que a produção não seja interrompida. Os recursos podem estar diretamente ligados à terra, matéria-prima, máquinas, mão-de-obra ou ao tempo (SILVA et al., 2005).

Os tipos de planejamento variam de acordo com seu horizonte no tempo, período no qual serão definidos os objetivos e as restrições (RODRIGUEZ e MOREIRA, 1989). O planejamento hierárquico inclui o curto (operacional), o médio (tático) e o longo prazo (estratégico).

Os modelos matemáticos para o planejamento hierárquico podem ser formulados para minimização de custos, maximização da receita líquida, maximização da produção, minimização do custo médio da produção (CARVALHO, 2012; RODE, 2014) ou para reduzir o tempo de execução do projeto.

Um modelo é uma formulação matemática, ou estatística, de uma simplificação de um problema real ou de um sistema natural. Muitos problemas florestais incluem muitas variáveis de decisão e são complexos, em termos de formulação matemática e resolução. Conforme Colin (2015) e Fávero e Before (2012), se o problema é muito complexo será necessária uma

simplificação do mesmo para que a modelagem e resolução sejam possíveis em tempo factível. Na maioria das vezes a função objetivo e as restrições são lineares que compõem o modelo são lineares (equações e inequações lineares). A formulação matemática da função objetivo e das restrições de fato contribui para organizar o conhecimento (RODRIGUES, 2001).

Vários problemas florestais se enquadram nos *Problemas de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos*, de natureza combinatorial, tais problemas podem ser resolvidos por otimização combinatoria (GREY e JOHNSON,1975), Nesses problemas, mesmo que em teoria a solução ótima possa ser encontrada por uma simples enumeração de possíveis soluções, na prática essa enumeração é impossível, pois a quantidade de soluções possíveis é extremamente alta e o tempo gasto inviabiliza esse tipo de resolução.

A maioria dos problemas idealizados para lidar com sequenciamento em projetos com restrição de recursos visa agendar as atividades do projeto com foco na minimização da sua duração (WEGLARZ, 2012). Conforme esse autor, as atividades têm um único modo de execução, com uma duração inteira fixa e sujeita as restrições de disponibilidade dos recursos necessários e de precedência, que indicam que umas atividades só podem ser iniciadas quando todas as suas antecessoras forem concluídas.

Os estudos sobre otimização são mais frequentes no manejo florestal, ou seja, no gerenciamento da floresta e de seus recursos florestais. Formulações matemáticas mais específicas para povoamento (silvicultura) são menos frequentes. As atividades que compõem a silvicultura incluem datas e prazos de liberação de atividades, execução sem atraso das atividades, horários fixos de início de atividade, vários tipos de sobreposições obrigatórias de atividades, requisitos e disponibilidades de recursos temporários. Por isso muitos problemas de ordem silvicultural se enquadram nos problemas de sequenciamento mencionados.

As atividades e práticas silviculturais podem ser executadas com número de trabalhadores por equipe variável; quanto menos trabalhadores por equipe, maior é o tempo gasto para realizar aquela atividade, por exemplo, uma atividade pode ser realizada por uma equipe de cinco pessoas gastando 10 dias ou por uma equipe de 10 pessoas desprendendo cinco dias de serviço (MENDONÇA, 2016).

A oportunidade de criar um modelo que pudesse suprir as necessidades descritas, num tempo hábil compatível com a dinâmica do negócio, impulsionou a elaboração deste estudo. O objetivo principal foi apresentar uma formulação matemática para resolução do problema de alocação de recursos escassos e sequenciamento de atividades, dentro da área florestal de uma empresa. No capítulo 1 é apresentada uma revisão bibliográfica envolvendo o

problema sob análise. No 2 é apresentada a formulação matemática do modelo e sua resolução com algoritmo genético e no 3, uma instância do problema com a formulação matemática e resolução por um método exato.

OBJETIVOS

Desenvolver formulações matemáticas para o problema de restrição de recursos e sequenciamento de atividades silviculturais, dentro de períodos de computação razoáveis;

Aplicar as formulações geradas para validá-las como forma de auxílio para os gestores florestais.

CAPÍTULO I

PROJETOS COM RESTRIÇÃO DE RECURSOS E SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES

INTRODUÇÃO

Um projeto pode ser considerado qualquer conjunto de atividades que tem um objetivo específico, com foco na gestão de recursos para gerar valor comercial, a ser concluído dentro de certas especificações, demandando recursos financeiros, materiais e humanos (KERZNER, 2017). A gestão de projetos permite aos gestores florestais programarem as atividades de acordo com as exigências técnicas, respeitando a disponibilidade de recursos e a distribuição destes recursos ao longo do tempo. A gestão de projetos envolve o planejamento, programação e controle do desempenho das atividades e o uso eficiente e eficaz dos recursos (DEMEULEMEESTER e HERROELEN, 2006) sejam eles renováveis ou não.

Os recursos podem ser classificados renováveis e, ou, não renováveis. Os não renováveis são aqueles que são consumidos e exauridos ao término de uma atividade, como os materiais e insumos; os renováveis são aqueles que ao final de uma atividade estão disponíveis para a próxima atividade, como a mão-de-obra (MENDONÇA, 2016). Existem aqueles que são classificados como parcialmente renováveis e parcialmente não renováveis, cujas disponibilidades são definidas para subconjuntos de períodos, que podem ter durações variadas (HERROELEN et al., 1999). O planejamento das atividades silviculturais permite

obter uma produção constante, de forma a não esgotar os recursos mandatórios para a realização das atividades (MOURA, 2013).

Alguns conceitos são introduzidos dentro do planejamento de projetos, como a precedência entre as atividades, definida como o ordenamento das atividades silviculturais, a sequência ideal tecnicamente para que elas ocorram. As relações de precedência entre duas atividades *i* e *j* podem ser de término-início, a atividade *j* só inicia quando a atividade *i* for concluída. Início-início, a atividade *j* inicia após a atividade *i* ser iniciada. Término-término: a atividade *j* só termina quando a atividade *i* termina. Início-Término: a atividade *j* só termina quando a atividade *i* inicia (HAJDU, 2018). A escolha da abordagem deve considerar o tipo de problema existente, cumprir a meta e os objetivos definidos.

Um conjunto de técnicas analíticas utilizado na modelagem e resolução de problemas de planejamento florestal é a Pesquisa Operacional (PO). A PO é composta por técnicas analíticas para resolução de problemas de otimização de recursos, de localização, roteirização, de planejamento e de alocação de mão-de-obra (LACHTERMACHER, 2004). Embora a PO seja mais relacionada com os modelos matemáticos determinísticos, de programação linear, inteira e dinâmica, além de alguns modelos estocásticos, é comum incluir metaheurísticas e alguns outros métodos de inteligência artificial. Para a escolha do modelo considera-se a capacidade de explicação da relação existente entre as variáveis envolvidas e a parcimônia. Se o problema pode ser resolvido por um modelo mais simples, este deverá ser o modelo escolhido.

O uso de métodos exatos, como a programação linear inteira, em problemas que apresentam muitas variáveis, têm como desvantagem o elevado esforço computacional, aliado muitas vezes a limitações na modelagem e na descrição de problemas reais, devido às complexas relações existentes e muitos fatores envolvidos (ARTIBA, 1997). Em tais casos uma abordagem alternativa são as metaheurísticas, que podem ser utilizadas em diversos tipos de problemas, sendo de implementação mais simples em relação aos algoritmos exatos (MONTEVECHI et al., 2002).

PLANEJAMENTO OPERACIONAL

O planejamento é a organização de recursos, sendo eles máquinas, pessoas, insumos, matéria-prima, e suas relações em um intervalo finito de tempo, de uma maneira lógica (TUBINO, 1997). Toda empresa possui um planejamento de longo prazo, aquele de abrange

metas e objetivos que demandam ações estratégicas e uma visão global. Os demais planos, de médio e de curto prazo, são utilizados para que os recursos sejam dimensionados de forma a atender ao plano global e para que seja implementada uma gestão de ação (BETTINGER et al., 2017). Um dos maiores desafios no planejamento florestal é a adaptação para ser aplicável na prática, devido à complexidade das interações de uma grande quantidade de restrições (WERNEBURG, 2015).

O planejamento estratégico, é o planejamento de longo prazo no qual são definidas as políticas e a organização da empresa, é definido por diretores e abrange todos as áreas dentro da empresa (WERNEBURG, 2015). Planejamentos que englobam 10, 20 anos têm elevada complexidade e demandam sistemas computacionais eficientes como ferramentas para suporte à decisão (RODRIGUES, 2011). O desmembramento do planejamento estratégico em horizontes menores, dá origem ao planejamento tático, a redução do horizonte de planejamento permite a inclusão de restrições operacionais e de infraestrutura (WERNEBURG, 2015) como dimensionamento da quantidade de máquinas e equipamentos.

O planejamento tático é a ponte entre o planejamento estratégico e o operacional, as metas são desenhadas para que a operação se alinhe à estratégia organizacional (BETTINGER et al., 2017). A subdivisão do horizonte de planejamento permite a inclusão de restrições operacionais e de infraestrutura para que o planejamento operacional possa atuar sem maiores problemas de restrição de insumos, máquinas, custos e trabalhadores (WERNEBURG, 2015).

O planejamento operacional pode envolver a designação de atividades, máquinas, trabalhadores (WERNEBURG, 2015), para cumprimento de metas e objetivos mensais, semanais e até diários, que ao final de um ano cumprem metas que, quando somadas às metas dos outros anos, apoiam o planejamento o estratégico.

Os planejamentos estratégico e tático não direcionam diretamente às atividades realizadas no presente, as decisões no nível operacional são as que determinam a execução das atividades, o tempo em que essas atividades irão ocorrer e a alocação de recursos destinadas a cada uma (SANTOS, 2019). Esse processo está relacionado aos objetivos e metas estratégicas, e fazem parte do planejamento a longo prazo, o que será considerado no planejamento operacional tem dependência direta com as restrições dos níveis hierárquicos mais altos (SANTOS, 2019). Quando a execução das atividades não corresponde ao que foi planejado, tem-se a possibilidade do replanejamento.

Estudos baseados em problemas em nível operacional ainda são incipientes (DEMS et al., 2017), eles permitem o detalhamento de situações que, em horizontes maiores, seriam inviáveis de se resolver, devido à complexidade do processamento. Quanto mais detalhado é o processo e quanto mais longo é o horizonte de planejamento, maior será a formulação do

problema, isso pode acarretar em problemas insolúveis, devido às limitações computacionais (BASSET et al., 1996).

Eventos incertos de alto impacto podem limitar o uso dos resultados do planejamento estratégico de uma empresa. Estas incertezas podem estar relacionadas a mudanças no cenário econômico, nas condições climáticas, variação de preços dos insumos e serviços (BETTINGER et al., 2017).

As relações, se não forem bem estruturadas no modelo, podem ter que sofrer alterações ao longo do horizonte do planejamento. Por isso a importância de estar preparado para absorver essas mudanças e redefinir o planejamento de médio e curto prazo (ALCIDES, 2013). A realidade traz consigo incertezas e eventos inesperados que podem mudar o rumo das atividades e, conseqüentemente, o andamento do planejamento. Quando atividades previstas no longo prazo não são executadas no tempo previsto, por falta de recursos ou condições meteorológicas, as atividades dos próximos períodos são reestruturadas e alteradas no modelo de curto prazo (SANTOS, 2019).

Problemas de regulação da área e produção para suprimento de fábricas que utilizam a madeira como matéria-prima são amplamente estudados (RODRIGUES et al., 2006; GOMIDE, 2009; BINOTI, 2012; BINOTI et al., 2014; CARVALHO et al., 2015; CARVALHO et al., 2017). A regulação de uma floresta fornece anualmente produção de igual volume (LEUSCHNER, 1984), com manejo da área e do crescimento florestal para atingir a produtividade necessária para o suprimento de matéria-prima.

A regulação florestal promove ganhos em termos de uniformidade da produção com relação ao volume e qualidade (DAVIS, 1966; citado por DYKSTRA, 1984). Uma floresta regulada permite a rotação da área de plantio em tamanho e produção semelhantes, a fim de atender a demanda por madeira anualmente. O conceito de regulação pode ser aplicado a situações diversas, basta ter o recurso limitado e o período em que esses recursos serão utilizados. A promoção de um quadro regular de trabalhadores deriva da divisão equalitária de atividades, de modo que permita a otimização do trabalho e o equilíbrio dos custos. A regulação florestal também contribui para um maior controle dos riscos de ocorrência de incêndios e de pragas devido à distribuição das árvores em idades e tamanhos diferentes (DAVIS, 1966; citado por DYKSTRA, 1984).

A autossuficiência e a prevenção da falta de madeira no mercado, são vantagens competitivas oriundas da regulação da produção florestal, que permite gerar a cada ano uma produção planejada para consumo, reduzindo a necessidade de compra de madeira de mercado.

Trabalhos com horizontes de planejamento de 12 meses utilizaram a modelagem das operações de colheita e transporte (RÖNNQVIST, 2003; BEAUDOIN et al., 2008; SANTOS, 2019), porém, problemas que considerem a execução de atividades diárias e semanais, otimizando a mão-de-obra florestal ainda são pouco explorados. São muitas as atividades que envolvidas no setor florestal, atividades em viveiros, nos plantios, que envolvem a manutenção das florestas, a colheita, rateio e transporte. A alocação de recursos envolvendo atividades silviculturais, tendo como objetivo a minimização dos custos e sequenciamento das atividades, foi desenvolvida em Moura (2013) para gerar plantios constantes ao longo do tempo.

Baseado na revisão destes trabalhos e outros encontrados na literatura, compreende-se que os modelos de otimização para planejamento tático e operacional são menos explorados do que os modelos para planejamento estratégico. Muitos desses modelos de otimização são resolvidos empregando métodos heurísticos (FARDIN, 2019; BINOTI, 2010; GOMIDE, 2009; RODRIGUES, 2001) na regulação da produção florestal e colheita florestal. No longo prazo esses modelos já foram amplamente modelados, porém estudos que abordam a modelagem da mão-de-obra no curto prazo ainda são incipientes, essa lacuna possibilitou a exploração deste tipo de problema, envolvendo regulação da mão-de-obra e programação de atividades silviculturais.

A REGULAÇÃO DA MÃO-DE-OBRA PARA REDUÇÃO DO TEMPO DO PROJETO

Pode-se fazer uma analogia entre floresta regulada e mão-de-obra regulada. Uma floresta regulada mantém um fluxo anual constante de volume de madeira. Essa restrição garante que, ao final do planejamento, a estrutura do povoamento seja organizada em idades sequenciais, variando de um até a idade de rotação regulatória (DAVIS et al., 2005). Uma floresta regulada apresenta uniformidade da quantidade, do valor, tamanho e qualidade do volume de madeira colhido, promove o equilíbrio dos custos anuais e receitas, promove a autossuficiência e evita a escassez de matéria-prima (DAVIS, 1966 apud DYKSTRA, 1984).

Em meio a diversos benefícios da regulação, estão a uniformidade da distribuição do trabalho, redução do deslocamento do trabalhador para outras regiões, reduzindo a despesa com hospedagem em hotel, alimentação fora da empresa, evita possíveis acidentes de trajeto durante a locomoção de uma região para outra. Todos esses benefícios geram um equilíbrio na gestão das atividades da empresa e evitam as horas ociosas de funcionários durante as fases com menor incidência de atividades.

Além de todos os benefícios mensuráveis para a empresa, existe também o bem-estar do trabalhador. A regulação do trabalho pode restringir o deslocamento dos trabalhadores para regiões mais distantes de sua residência, para realizar atividade em outra região, ficando dias ou meses distantes da família, amigos e de sua rotina.

A regulação da mão-de-obra pode ser usada em qualquer setor dentro de qualquer empresa, independentemente da dimensão da produção e da quantidade de funcionários e, quanto maior a dimensão da produção, mais complexa se torna a regulação da mão-de-obra, demandando mais do algoritmo e da máquina de processamento, em questão de tempo e memória para processamento. A ênfase desse trabalho são as atividades silviculturais para plantios de espécies do gênero *Eucalyptus*.

As atividades silviculturais englobam as necessidades de cuidado, preparação, cultivo e manutenção desde o preparo do solo, chegada da muda em campo, até o momento da colheita (MOURA, 2013). As recomendações técnicas devem ser seguidas e, certas atividades devem ser realizadas com critério e no prazo exigido. O planejamento da sequência das atividades, definição dos tipos e quais são as precedências, as condições climáticas, disponibilidade de mão-de-obra qualificada e máquinas, todos esses são fatores importantes que influenciam os prazos das atividades e a execução eficiente do projeto.

O acúmulo de mão-de-obra em determinados meses e uma variação ampla do quadro de mão-de-obra, torna o projeto operacionalmente não satisfatório, já que existe mão-de-obra disponível igualmente durante todo o ano. O gerenciamento de projetos nas empresas possibilita ter um maior controle sobre os recursos humanos, tendo em vista o crescimento do negócio por meio do aperfeiçoamento do planejamento para atingir as metas estratégicas.

GERENCIAMENTO DE PROJETOS SILVICULTURAIS

No século XIX, o liberalismo econômico mudou o foco das florestas, o propósito se voltou para a geração de lucros para os proprietários e maximização dos mesmos. Essa mudança gerou também uma atenção maior para a pesquisa e a gestão das atividades, novas ferramentas e conceitos para tomada de decisão foram exigidos, deu-se início ao inventário das florestas e ao acompanhamento do seu crescimento (PUETTMANN et al., 2009).

Dois dos conceitos mais notáveis surgidos no século XIX foram o de floresta normal e a fórmula de Faustmann, conhecida também como Valor Esperado da Terra (VET) (PUETTMANN et al., 2009). Floresta normal é aquela que possui plantios em todas as idades, de ano em ano, de um ano até a idade de rotação, (RODRIGUES, 1997). Ela possui, ainda, incrementos e estoque de crescimento normais, para todo ano uma área ter idade para colheita e assim suprir anualmente a demanda por madeira, isso resulta em um estoque normal

(LEUSCHNER, 1984).

Alguns autores destacam que o conceito de floresta normal é teórico e difícil de se colocar em prática, visto a gama de fatores que influenciam os plantios, como a capacidade produtiva do local, mudanças nas técnicas empregadas nos plantios, mudança no objetivo do manejo da floresta (SALO e TAHVONEN, 2002; OSMASTON, 1968). Comparando os conceitos de uma floresta normal e uma floresta regulada, pode-se definir que toda floresta normal é uma floresta regulada, mas nem toda floresta regulada é normal, pois uma floresta regulada pode apresentar características distintas como as espécies que compõe a floresta (LEUSCHNER, 1984). Já o valor esperado da terra (VET) representa a soma dos valores atuais das receitas líquidas ao final de ciclos de produção de uma cultura florestal repetidas perpetuamente.

Ainda no século XIX, as decisões silviculturais passam a considerar a produtividade da floresta, o crescimento atual e o esperado das árvores, índices que refletiam nos lucros (PUETTMANN et al., 2009).

As florestas públicas, florestas em pequenas propriedades privadas e florestas para fins industriais, tinham diferentes restrições e objetivos, mas essas diferenças não refletiam no ensino da silvicultura para diferentes fins. Por isso houve dominância de uma filosofia, a do liberalismo econômico, expressado na homogeneização da paisagem, e isso não mudou significativamente antes de 1990 (PUETTMANN et al., 2009). Em algumas regiões da América do Norte, as florestas passaram a ter valores diferentes, as industriais passam a ter rotações mais curtas, as públicas passam a ter a gestão orientada para manejo de ecossistemas, com rotações mais longas e colheita parcial, e as pequenas propriedades estavam entre os dois extremos de manejo, com foco em valores ecológicos e recreacionais (PUETTMANN et al., 2009).

Um fator importante que mudou a relação do ser humano com as florestas foi o progresso da ciência sobre os ecossistemas florestais, nos tempos romanos, os humanos desenvolveram o entendimento da regeneração, germinação e taxas de crescimento de espécies florestais (PUETTMANN et al., 2009). O estabelecimento de instituições de pesquisa governamentais e cursos florestais em universidades – 1792 na Alemanha, 1805 na Rússia, 1824 na França, 1862 na Finlândia, 1870 no Reino Unido, 1898 nos Estados Unidos – deixa claro que a silvicultura passa a ser reconhecida como uma disciplina científica (PUETTMANN et al., 2009).

Fatores externos às atividades silviculturais impulsionaram grandes mudanças no manejo florestal ao longo da história (PUETTMANN et al., 2009). A pressão do crescimento

populacional sobre os recursos naturais, combinado com as mudanças no padrão de vida, influenciaram a demanda por produtos vindos das florestas (PUETTMANN et al., 2009), o que exigiu um conhecimento maior sobre o manejo das florestas comerciais.

O conceito básico de silvicultura ou práticas silviculturais é a interação entre as plantas, o ambiente físico e biológico (MENDONÇA, 2016). As técnicas e os recursos empregados para a realização dessas práticas, como a mão-de-obra, materiais e equipamentos, influenciam no rendimento e nos custos dessas práticas (MENDONÇA, 2016). A consolidação das práticas silviculturais e o seu contínuo aprimoramento promovem alto rendimento das florestas, que demandam cada vez mais uma maior produtividade devido à restrição da quantidade de terras e custos gerados pela aquisição ou arrendamento de terras.

As atividades iniciam desde a concepção das mudas em viveiro até as últimas atividades anteriores à colheita. As práticas iniciadas no viveiro, tem proporcionado uma qualidade melhor das mudas e consequente possibilidade de aumento de produtividade em campo (ELLI et al., 2019).

O eucalipto possui taxas de crescimento que variam com a idade, na fase inicial ocorre um arranque, esse crescimento desacelera com idade até manter-se praticamente constante. Sendo assim as atividades tem papéis diferentes em cada fase do crescimento (FERREIRA e STAPE, 2009; STAPE et al., 2006). É importante destacar que uma atividade, por exemplo, preparo de solo, terá respostas diferentes em tipos de solos diferentes, assim como a fertilização e a irrigação. Solos com estruturas físico-químicas diferentes e teores de matéria orgânica variantes, apresentam comportamentos distintos com relação à irrigação (STAPE et al., 2006). Solos com textura arenosa e argilosa respondem diferentemente ao preparo do solo, à infiltração e retenção de água. O preparo de solo proporciona ganhos na produtividade por favorecer o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular (FERREIRA e SILVA, 2008).

A resposta à fertilização segue a mesma tendência. Stape et al. (2010) mostraram que a resposta de crescimento em algumas regiões a doses superiores de fertilizante comparada à fertilização tradicional da empresa, não apresentou diferença no crescimento. Porém, a resposta média entre os ensaios de fertilização de "parcelas gêmeas", tiveram um aumento de 15 a 20% no crescimento (STAPE et al., 2006), diferindo o incremento em neossolos de textura grossa e fina. Isso indica que a atividade realizada operacionalmente na empresa deve ser direcionada especificamente para cada região distinta.

No geral, o crescimento inicial do eucalipto é mais afetado pela competição com daninhas (LONDERO et al., 2012) e fertilização. Além disso, na fase inicial do crescimento, o

controle de formiga cortadeira (CANTARELLI, 2005; ZANETTI et al., 2003) e a qualidade da muda vinda do viveiro (tratos feitos antes da muda chegar ao campo) (ELLI, et al., 2019), também são fatores importantes.

O período crítico de prevenção das plantas daninhas, está entre o período que antecede a interferência no crescimento do eucalipto podendo causar dano econômico, e o período em que a daninha não causa mais interferência no crescimento do eucalipto (PITELLI, 1987). Logo, a prevenção de daninhas deve iniciar antes que o período crítico comece e cause perdas irreversíveis na produtividade. Existem períodos de controle que devem ser considerados nos quais a concorrência com o eucalipto se torna expressivamente maior, para avaliação do diâmetro, o período de controle seria dos 14 aos 140 dias após o plantio das mudas (TOLEDO et al., 2000).

Com o plantio já estabelecido, a matocompetição deixa de interferir no crescimento como no início do plantio, cria-se então uma oportunidade para redução de custos e menor intervenção no ambiente (GARLET et al., 2015). O controle químico de plantas daninhas é amplamente utilizado pelas empresas de base florestal. Cerca de 30% dos custos totais de produção e 50% da mão-de-obra para o plantio do eucalipto, são destinados ao controle químico (PEREIRA e ALVES, 2015).

Lobato (2016) constatou a sensibilidade dos micro-organismos presentes no solo aos produtos químicos usados para controle de daninhas, micro-organismos esses que são indicadores de qualidade do solo devido a sua grande importância na ciclagem de nutrientes. Além disso, constatou-se também que a deposição de resíduos no solo dificultou a penetração do herbicida pré-emergente, diminuindo sua eficácia (LOBATO, 2016) implicando em maiores doses e maiores custos (FERREIRA et al., 2010).

Garlet e Costa (2014) avaliaram o efeito do controle de plantas daninhas total e parcial sobre o ataque de insetos-praga em plantios de eucalipto e foi constatado que controlar 100% as daninhas, implicou em maior ataque de pragas às plantas de eucalipto, deve-se isso ao fato de que plantas daninhas podem servir como primeira opção das pragas, e também devido à diversidade de espécies atrair inimigos naturais dos insetos-praga. Logo, manter uma faixa de plantas daninhas sem controle seria uma opção para reduzir o ataque de insetos-praga e não comprometer a produção. Londero et al. (2012) afirmam que o controle deve ser realizado até os 140 dias da implantação, pois essa é a fase crítica de dano econômico. A partir desse período o controle parcial pode ser implementado.

Assim como a matocompetição pode ser repensada, a dosagem de fertilizante pode ser ajustada caso a dose utilizada seja maior do que a dose que permite o máximo crescimento

potencial da região. É importante definir a dose ótima de fertilização para cada situação, mas, sem excesso, para evitar custos desnecessários. É sabido que a fertilização promove maior crescimento, porém, em idades mais avançadas a reação à fertilização pode não ocorrer como esperado (JOHNSTON et al., 1977).

É preciso reconhecer a heterogeneidade dos locais e essa conscientização das empresas é vista pela implementação da silvicultura de precisão (VETTORAZZI e FERRAZ, 2000). A silvicultura de precisão surgiu pela necessidade de otimizar os recursos e impactar minimamente o meio ambiente, realizando as atividades planejadas por local e de modo que o custo/benefício seja máximo (VOLL, 2000).

Não há como prever o comportamento do crescimento das árvores em resposta aos tratamentos silviculturais, mas sabe-se que o investimento feito no início do plantio terá mais tempo para dar o retorno esperado do que o investimento feito no final da rotação, assim, os custos dos tratamentos silviculturais no início do crescimento, devem ser examinados com maior critério (JOHNSTON et al., 1977). Moura (2013) usou a programação para alocar recursos destinados às atividades silviculturais a fim de regular as áreas de plantio, sequenciando-as de modo a minimizar os custos de execução.

O sequenciamento das atividades no gerenciamento de projetos, permite a compreensão e análise das possíveis alternativas para se trabalhar de forma eficiente durante a execução do projeto. Existe uma sequência que viabiliza e otimiza o crescimento das florestas e o planejamento dessas atividades permite essa otimização. A otimização do uso dos recursos por meio do sequenciamento das atividades é de interesse não apenas da pesquisa, mas também do setor industrial.

METAHEURÍSTICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO FLORESTAL

A complexidade dos problemas envolvidos no planejamento florestal pode gerar uma grande quantidade de alternativas e envolver um grande número de variáveis até o ponto em que inviabiliza a procura por uma solução ótima por meio de métodos matemáticos exatos como a programação linear, programação inteira mista, programação dinâmica. Isto levou ao desenvolvimento de modelos mais robustos que demandam maior esforço computacional e que otimizem a busca de uma solução boa que satisfaça o problema, diante de um universo de soluções possíveis. São os métodos heurísticos.

As heurísticas são importantes ferramentas na solução de problemas de manejo florestal devido à sua flexibilidade na abordagem de problemas amplos, geralmente não-lineares e inteiros, porém, elas exigem esforço adicional para projetar e identificar os parâmetros apropriados para cada problema (BETTINGER e BOSTON, 2017). Elas evoluíram para metaheurísticas, capazes de realizar análises combinatórias por meio de sucessivas iterações (DOERNER et al., 2007).

No setor florestal, as metaheurísticas mais usadas são os algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975), *simulated annealing* (KIRKPATRICK et al., 1983) e a busca tabu (GLOVER, 1986). São metaheurísticas adaptáveis a problemas genéricos (RODRIGUES et al., 2003).

A busca da solução e a complexidade da metaheurística serão baseadas no problema e no conhecimento da pessoa que irá desenvolvê-la. É necessário ressaltar que a solução encontrada é a melhor solução de um conjunto de soluções possíveis, porém, não existe garantia que esta solução seja a melhor solução global (DOERNER et al., 2007). As metaheurísticas são processos de otimização estocástica, que empregam algoritmos de busca com algum grau de aleatoriedade, a fim de encontrar uma solução ótima ou próxima da ótima em problemas NP-difíceis (LUKE, 2011). Entre os obstáculos específicos existentes para a resolução de um problema de otimização, como a existência de muitas alternativas a serem testadas, estão as estruturas complexas, de modo que é difícil determinar quais componentes são responsáveis pelo bom desempenho (HOLLAND, 1975). Uma heurística apresenta duas estratégias básicas: "dividir e conquistar" e a melhoria iterativa (KIRKPATRICK et al., 1983).

Uma metaheurística pode apresentar de um a vários parâmetros que influenciam a busca de uma solução. A quantidade de parâmetros é influenciada pelo tamanho e tipo de problema (BETTINGER e BOSTON, 2017). Quando as condições mudam e a situação sofre alguma interferência, os parâmetros também sofrem mudanças.

A *simulated annealing* é uma metaheurística probabilística de busca local baseada na termodinâmica e relacionada com um sistema de resfriamento, diz respeito ao que acontece com os átomos em um sistema quando a temperatura é reduzida gradativamente (KIRKPATRICK et al., 1983). Se isso não for feito, pode ocorrer um desequilíbrio no arranjo do cristal. O processo inicia com uma temperatura de recozimento simulado a fim de obter melhores soluções heurísticas para problemas de otimização

combinatória (KIRKPATRICK et al., 1983). A melhoria iterativa, comumente aplicada para tais problemas, é muito parecido com o processo de rearranjo microscópico modelado por mecânica estatística, com a função custo desempenhando o papel de energia (KIRKPATRICK et al., 1983).

No planejamento florestal, SA auxilia na tomada decisão, seja para programação da colheita (LOCKWOOD e MOORE, 1993), para testar alternativas de manejo visando a maximização do VPL, visto que uma atividade feita em uma área pode influenciar a produtividade em outra área próxima, como exemplo a colheita em uma área pode expor outra área a ventos e causar danos (TARP e HELLES, 1997). O SA pode ser usado para alocação de recursos, como a terra, classificando-a em zonas para o manejo florestal (BOYLAND et al., 2004), e alocação de terras para diversos usos (AERTS e HEUVELINK, 2002).

Na busca tabu como o nome já diz, o processo de busca forma uma lista tabu de soluções que foram exploradas, para que a heurística não retorne a soluções recentemente analisadas (RODRIGUES et al., 2003). Belhaiza et al. (2014) usou a busca tabu para problemas de roteamento de veículos. No trabalho de Laroze e Greber (1997) encontrou-se uma pequena diferença entre a programação inteira e busca tabu para diferentes restrições a preços de mercado de *Pinus radiata*. A solução encontrada por meio da busca tabu teve o lucro aproximadamente 3% menor do que o valor encontrado pela programação inteira, considerando restrições de mercado relativamente simples e o *Pinus* homogêneo.

A busca tabu também pode ser aplicada em problemas de planejamento da colheita florestal e construção de estradas, minimizando-se o custo das atividades, mantendo uma demanda de volume de madeira e regulação ambiental como restrições (RICHARDS e GUNN, 2000). A busca Tabu também já foi empregada em métodos híbridos para problemas de roteamento (FLISBERG et al., 2009), devido à complexidade do problema e grande número de variáveis.

Cada heurística é baseada em um critério de maior importância, na heurística física o que importa é a qualidade do objetivo e não a rapidez com que é alcançado. As heurísticas biológicas dão importância também à rapidez com que o objetivo é atingido. Nesse sentido, os algoritmos biológicos são mais gananciosos (SALAMON et al., 2002).

Holland (1975) em seu livro descreveu problemas desse tipo baseado nos seguintes questionamentos: Como, a partir da evolução, gera-se organismos cada vez mais adaptados a ambientes inconstantes e incertos? Que tipo de plano econômico pode aperfeiçoar o desempenho de uma economia, sendo que os dados relevantes são obtidos à medida que a economia se desenvolve? Como o sistema se adapta conforme “orientação sensorial” sabendo

o que fazer ao invés de como fazer? Como um organismo modifica seu comportamento de maneira benéfica a partir de experiências?

O algoritmo genético (AG) é uma técnica de otimização e busca baseada nos princípios da genética e seleção natural (HAUPT e HAUPT, 1998). Baseado na teoria de Darwin, organismos mais adaptados sobrevivem e geram descendentes, podendo nesse tempo existir ou não mutação. O algoritmo genético tem a capacidade de explorar com eficiência grandes espaços sobre os quais pouco se sabe a priori (VAFAIE e DEJONG, 1992).

As metaheurísticas Algoritmo Genético, Busca Tabu e *Simulated Annealing* foram aplicadas por meio de estudos de caso por Rodrigues (2001). Este autor comparou o resultado do método exato *branch and bound* com os resultados gerados por combinações de diferentes parâmetros nos algoritmos genéticos. A eficácia média do AG comparado ao resultado do algoritmo exato *branch and bound* foi de 94,28%. Para problemas maiores, o AG teve eficiência cinco vezes maior e apresenta-se como uma ferramenta importante para resolução de problemas complexos dentro do gerenciamento florestal.

ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos genéticos (AG) são algoritmos de busca da melhor adaptação um cromossomo representa uma das possíveis soluções do problema, num espaço de soluções admissíveis, o gene é a característica do problema e o alelo é o valor da característica (SIVANANDAM e DEEPA, 2008). Os cromossomos estão sujeitos a processos evolucionários que envolvem seleção, recombinação e mutação. A partir desses processos, obtém-se a solução mais apta para o problema. A solução é determinada pelo critério de parada, que pode ser definido pelo total de ciclos de evolução (número de gerações), pelo total de tentativas em um experimento (número de indivíduos), entre outros.

Um AG permite que uma população de muitos indivíduos evolua de acordo com as regras de seleção específicas para maximizar a adaptação, ou seja, maximizar ou minimizar uma função de custo. O termo adaptação pode ser usado para entender como um sistema de otimização funciona, buscando uma solução adaptada ao problema em questão. O recurso mais característico da adaptação é a resposta lenta às informações atuais para eliminar a incerteza devido a informações a priori insuficientes, e também otimizar o desempenho de uma determinada variável selecionada (DE JONG, 1975). O trabalho de De Jong (1975) mostrou a utilidade do AG para otimização de funções e fez o primeiro esforço conjunto para encontrar parâmetros AG otimizados.

Os operadores genéticos são necessários para que se mantenha a diversidade genética da população. Os dois tipos de operações são o crossover (recombinação) e a mutação. A mutação é realizada para que se introduza características novas à população e para que a busca pela solução ótima ou quase ótima fuja dos mínimos locais (HAUPT e HAUPT, 1998). O crossover é a causa da recombinação genética, pode ocorrer em um ou mais pontos ou uniformemente.

Um AG tem como vantagem trabalhar com variáveis contínuas ou discretas, com superfícies de custo extremamente complexas e amplas, fornece um grande número de variáveis ótimas, e não apenas uma, trabalha com variáveis codificadas para que a otimização seja feita por código, utiliza funções probabilísticas e não determinísticas, além de ser capaz de adaptar-se a fatores ambientais e convergir para soluções ótimas, ou quase ótimas em níveis globais, entre outras.

AG's tem uma diversidade de aplicações, em problemas de regulação florestal (BINOTI, 2010), com associação de variáveis ambientais e sociais visando o manejo da paisagem, por meio de imagens de satélite em inventário florestal de florestas nativas, (TOMPPO e HALME, 2004), para classificação de imagens (VAN COILLIE et al., 2007). A união de dados numéricos e geográficos por meio do AG com múltiplos objetivos e ferramentas GIS, possibilitou otimizar o planejamento da exploração florestal, tornando-o viável tanto em termos de produtividade quanto espacialmente (DUCHEYNE et al., 2006), Fotakis et al. (2012) também combinou AG com operadores espaciais para planejamento florestal. Combinados ou não com algum outro método são importantes ferramentas para tomada de decisão seja para maximizar ou minimizar uma função de custo com restrições de diversas naturezas. Os passos de um AG podem ser observados na Figura 2. O processo se repete até a busca atingir o critério de parada.

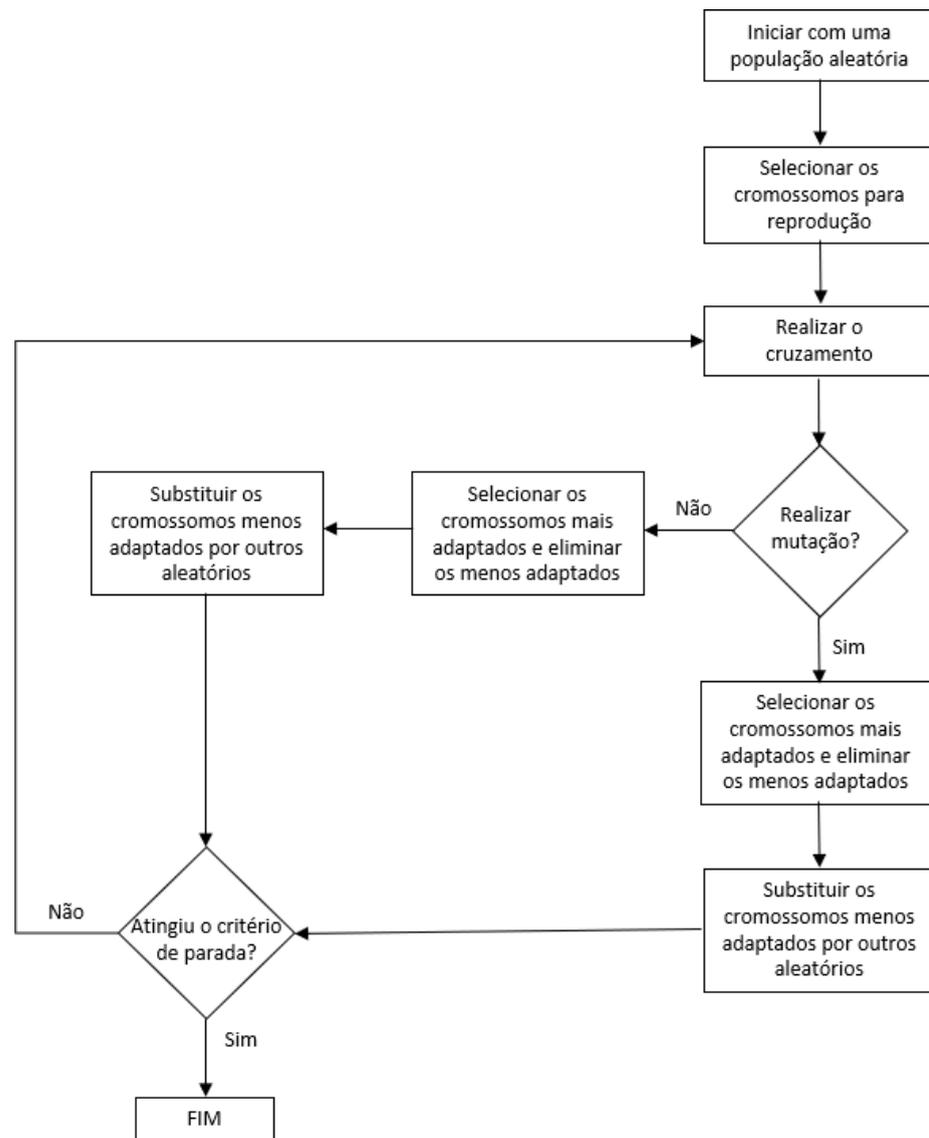


Figura 1 – Fluxograma Algoritmo Genético. Adaptado de Sivanandam e Deepa, 2008.

População

Inicialmente, a população é gerada aleatoriamente ou com a ajuda de uma heurística de construção (SIVANANDAM e DEEPA, 2008). Cada indivíduo representa uma solução potencial para o problema que está sendo resolvido. Esta solução é obtida por meio de um mecanismo de decodificação. Cada indivíduo na população recebe, por meio de uma função de aptidão, ou função *fitness*, uma medida de sua qualidade com relação ao problema em questão (SIVANANDAM e DEEPA, 2008). Este valor é a informação quantitativa que o algoritmo usa para orientar a pesquisa (CHAMBERS, 2000). A definição do tamanho da população é essencial para a qualidade da resposta e para o tempo de convergência do

algoritmo genético (MICHALEWICZ, 1996). A população no geral apresenta de 20 a 200 indivíduos (QUEIROZ, 2005), a complexidade do problema deve ser considerada, pois quanto mais complexo o problema e maior é a quantidade de indivíduos, maior é o tempo de processamento para resolução do problema.

Função *Fitness*

A função fitness é um valor que representa a qualidade da solução encontrada. Ela pode ter o objetivo de minimizar ou maximizar um valor de interesse, dentro dos parâmetros estabelecidos. A introdução de penalidades na função, é uma maneira de punir a função caso seja descumprida alguma restrição. As penalidades são somadas à função em problemas que visam minimizar uma função, ou subtraídas quando o objetivo é maximizá-la. Ou seja, as restrições são incorporadas à função de aptidão como forma de penalidade por não cumprimento, isso torna o problema mais flexível para encontrar uma solução em problemas complexos.

Processos evolucionários, seleção, recombinação e mutação

O processo evolucionário opera sobre a decodificação de cromossomos que estruturam os organismos. Esse processo ocorre durante a reprodução e existem diversos mecanismos reprodutivos na natureza, como a recombinação e a mutação (SIVANANDAM e DEEPA, 2008).

Os operadores genéticos têm a função de modificar a população durante o processo evolucionário, estes operadores promovem a diversificação e buscam manter as melhores características de adaptação obtidas nas sucessivas gerações.

A seleção natural é o mecanismo que relaciona os cromossomos com a eficiência do organismo que representam, permitindo assim a qualidade deste organismo (SIVANANDAM e DEEPA, 2008). Assim funciona a seleção em AG, depois de definir uma codificação dos cromossomos iniciais, a próxima etapa é decidir como realizar a seleção, ou seja, como escolher os pais na população que criarão descendentes para a próxima geração e quantos descendentes serão criados (SIVANANDAM e DEEPA, 2008).

O propósito da seleção é enfatizar os indivíduos mais aptos na população, na esperança de que seus filhos tenham maior aptidão. De acordo com a teoria da evolução de Darwin, os melhores sobrevivem para gerar novos descendentes, os indivíduos melhor adaptados são selecionados para procriação a partir de operadores de seleção. A roleta russa; a amostragem estocástica universal (*stochastic universal sampling*) e a amostragem aleatória salvacionista, são alguns dos operadores utilizados, (GOMIGE, 2009).

Na amostragem estocástica universal opera-se uma roleta que permite múltiplas seleções, as agulhas ficam espaçadas a distâncias iguais entre si, e necessita da probabilidade inicial, a quantidade de ponteiros é igual a quantidade de indivíduos a serem selecionados (GOMIDE, 2009).

O que caracteriza o aleatório salvacionista é que todos os indivíduos apresentam as mesmas chances de serem selecionados, ele seleciona “n” indivíduos da população aleatoriamente, isso pode gerar uma grande variância populacional e dificultar a busca. No entanto, este método exige que o melhor indivíduo seja selecionado também (VICTORINO, 2005).

A roleta russa utiliza uma amostragem estocástica, onde a probabilidade de seleção de um indivíduo é proporcional ao seu *fitness*. Considera-se um círculo dividido em “n” áreas proporcionais à aptidão do indivíduo, sobre este círculo existe uma roleta com n cursores igualmente espaçados, gira-se a roleta e onde os cursores pararem são os indivíduos selecionados (MALAQUIAS, 2006). Os indivíduos com maiores áreas, terão maiores chances de serem selecionados mais de uma vez e a consequência disso, é que a seleção pode apresentar cópias de um mesmo indivíduo e outros podem desaparecer (MALAQUIAS, 2006). A roleta russa é usada em muitos trabalhos envolvendo AG e sua grande aplicação pode estar relacionada à fácil implementação (COLEY, 1999).

Após a seleção dos indivíduos, ocorre a recombinação de genes entre cromossomos, que é conceituado como o cruzamento (*crossover*). O cruzamento é feito entre dois cromossomos escolhidos para a reprodução. Esse processo dá origem à geração de filhos, que posteriormente são adicionados à população dando continuidade à recombinação. A recombinação de genes ou *crossover*, deve acontecer a uma taxa pré-definida e pode ser ajustada de acordo com necessidade de obter uma maior ou menor taxa de recombinação, resultando em características fenotípicas melhores ou não. O objetivo é gerar e manter os cromossomos viáveis dentro da população, mas esbarra em um problema dos operadores, eles são cegos às restrições (REEVES, 2003; CHAMBERS, 2000) e trabalham de maneira aleatória.

As restrições podem ser trabalhadas de forma indireta, elas são vistas como penalidades em caso de violação, portanto, essas penalidades precisam ser minimizadas (CHAMBERS, 2000).

As vantagens do tratamento indireto de restrições são:

- Generalidade;
- Redução do problema para otimização “simples”;

- Possibilidade de incorporar as preferências do usuário por meio de pesos.

A desvantagem do tratamento indireto de restrições é a perda de informações ao empacotar tudo em um único número (CHAMBERS, 2000).

Além do crossover, que explora a solução atual para buscar por melhores soluções, a mutação é considerada um operador simples que explora todo o espaço de busca. A mutação é usada para manter a variabilidade genética da população enquanto modifica aleatoriamente a uma taxa pré-definida os genes os indivíduos. A mutação ajuda a escapar dos mínimos locais, evita que o algoritmo fique preso em um mínimo local e desempenha o papel de recuperar os materiais genéticos perdidos, bem como de perturbar aleatoriamente a informação genética (SIVANANDAM e DEEPA, 2008).

Critério de parada

O critério de parada nos algoritmos genéticos assume diversas condições, resumidamente, alguns dos critérios de parada são: o número especificado das gerações da evolução; o tempo especificado de execução do algoritmo; ou quando não houver mudança na melhor solução para um determinado número de gerações (SIVANANDAM e DEEPA, 2008).

PROGRAMAÇÃO LINEAR E LINEAR INTEIRA NA OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS

A pesquisa operacional é multidisciplinar e muito útil na resolução de problemas complexos (KUTER et al, 2017). Na pesquisa operacional, dentro dos métodos exatos, existem a programação linear (PL), inteira (PI), inteira mista (PIM), dinâmica (PD) e multiobjetivo (PMO).

A programação linear é um método de otimização matemática, que busca maximizar ou minimizar uma função, chamada de função de custo ou função objetivo. Na programação linear, a relação entre as variáveis da função objetivo é linear, assim como a relação das variáveis das restrições (DENARDO, 2011). Sendo assim, dois elementos-chave desses modelos são que todos os relacionamentos devam ser quantificáveis e lineares. A saída, ou solução, para um problema de programação linear fornece uma avaliação quantitativa das atividades de gerenciamento propostas (BETTINGER et al., 2017).

Quatro principais pressupostos da programação linear são: proporcionalidade, aditividade, divisibilidade e certeza (BETTINGER et al., 2017).

- Proporcionalidade: Cada variável do modelo é associada a um coeficiente.
- Aditividade: Cada variável da função objetivo é independente das outras variáveis.
- Divisibilidade: Cada valor associado a uma variável deve ser um número real contínuo, ou seja, zero ou maior do que zero. Em alguns casos esses valores devem ser inteiros, por exemplo quando se tratar de número de toras. São casos específicos de programação inteira.
- Certeza: É assumido que os valores associados às variáveis são conhecidos com certeza, não existindo qualquer fator aleatório relacionado a eles.

Um modelo de programação linear pode ser descrito como:

$$\text{Max ou Min: } F(o) = f(x)$$

Um modelo é a representação simplificada de um problema real que visa simular um sistema influenciado por diversas variáveis. Um sistema pode ser tão complexo que é necessário simplificá-lo para conseguir solucioná-lo (COLIN, 2015; FÁVERO e BELFIORE, 2012). As principais variáveis que exercem influência sobre o resultado de interesse, são incluídas no modelo e denominadas variáveis de decisão. As variáveis de decisão são sujeitas às restrições pertinentes ao problema, as restrições podem ser definidas como equações ou inequações, as quais as variáveis de decisão devem atender (COLIN, 2015; FÁVERO e BELFIORE, 2012).

Um modelo de programação linear pode parecer simples, mas resolve uma gama incrivelmente diversa de problemas que podem ser apresentados como programas lineares, algoritmos como o método simplex resolve quase todos os programas lineares com velocidade incrivelmente rápida (DENARDO, 2011).

A saída ou solução de um problema de programação linear é uma variável quantitativa que atende ao objetivo e às restrições do problema (BETTINGER et al., 2017). A solução ótima para um modelo de maximização é aquela cujos valores das variáveis de decisão maximizam o valor da função objetivo, e no caso de um modelo de minimização, a solução ótima é aquela cujos valores das variáveis de decisão minimizam o valor da função objetivo. Problemas lineares inviáveis surgem na prática, quando alguma das restrições não puder ser atendida, ou quando existir inconsistência entre as restrições.

A programação linear inteira, permite que as variáveis de decisão assumam valores binários, como 0 e 1, tornando o problema de alta complexidade e demandando um esforço computacional grande, quando comparado aos programas lineares (MENDONÇA, 2016). Problemas que apresentam muitas variáveis e restrições, variáveis de valor inteiro, demandam

alto desempenho computacional (DYKSTRA 1984; DENARDO, 2011), por isto, por vezes é necessário simplificar o problema para poder solucioná-lo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERTS, J. C. J. H.; HEUVELINK, G. B. M. Using simulated annealing for resource allocation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 16, n. 6, p. 571-587, 2002.

ALCIDES, F. R. Aspectos que influenciam o planejamento nas empresas florestais. 2013. 65f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2013.

ARTIBA, A.; ELMAGHRABY, S. E. The Planning and Scheduling of Production Systems. Ed. Chapman & Hall, Londres, UK, 1997.

BASSETT, M. H.; PEKNY, J. F.; REKLAITIS, G. V. Decomposition techniques for the solution of large-scale scheduling problems. **AIChE Journal**, v. 42, n. 12, p. 3373-3387, 1996.

BEAUDOIN, D.; FRAYRET, J-M.; LEBEL, L. Hierarchical Forest management with anticipation: an application to tactical-operational planning integration. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 8, p. 2198-2211, 2008.

BELHAIZA, S.; HANSEN, P.; LAPORTE, G. A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows. **Computers & Operations Research**, v. 52, p. 269-281, 2014.

BETTINGER, P.; BOSTON, K. Forest planning heuristics—Current recommendations and research opportunities for s-metaheuristics. **Forests**, v. 8, n. 12, 2017.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. 2nd ed. Academic press, 2017.

BETTINGER, P.; DEMIRCI, M.; BOSTON, K. Search reversion within metaheuristics: impacts illustrated with a forest planning problem. *Silva Fennica*, v.49, n.2, p.1-20, 2015.

BINOTI, D. H. B. **Estratégias de regulação de florestas equiâneas**. 2010. 159f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. D. S.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; OLIVEIRA, M. L. R. D.; CAMPOS, J. C. C.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. Á. S. Regulação de florestas equiâneas com restrição de classes de idade por compartimento. *Cerne*, v. 20, p. 567-573, 2014.

BOSTON, K.; BETTINGER, P. An Analysis of Monte Carlo Integer Programming, Simulated Annealing, and Tabu Search Heuristics for Solving Spatial Harvest Scheduling Problems. *Forest Science*, v. 45, n. 2, p. 292-301, 1999.

BOYLAND, M.; NELSON, J.; BUNNELL, F. L. Creating land allocation zones for forest management: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 34, n. 8, p. 1669-1682, 2004.

CANTARELLI, E. B. **Silvicultura de precisão no monitoramento e controle de formigas cortadeiras em plantios de Pinus**. 2005. 95f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2005.

CARVALHO, K. H. A. de. **Influência de variáveis econômicas em modelos de regulação florestal**. 2012. 115f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2012.

CARVALHO, K. H. A. de; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B. Influência da taxa de juros e do preço da madeira em modelos de regulação florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 35, n. 82, p. 143-151, 2015.

CARVALHO, K. H. A. de; DA SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, L. F. da. Influência de diferentes funções objetivo em modelos de regulação florestal. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 10, n. 4, p. 371-380, 2017.

CHAMBERS, L. D. **The practical handbook of genetic algorithms: applications**. Chapman and Hall/CRC, 2000.

COLIN, E. C. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2015

DEJONG, K. A. **Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems**. 1975. 271f. Tese University of Michigan, Hampton, Virgínia, 1975.

DEMS, A; ROUSSEAU, L-M; FRAYRET, J-M. Annual timber procurement planning with bucking decisions. **European Journal of Operational Research**, v. 259, n. 2, p. 713-720, 2017.

DENARDO, E. V. **Linear programming and generalizations: A problem-based introduction with spreadsheets**. Springer Science & Business Media, 2011.

DOERNER, K. F.; GENDREAU, M.; GREISTORFER, P.; GUTJAHR, W.; HARTL, R. F.; REIMANN, M. **Metaheuristics: Progress in complex systems optimization**. Springer Science & Business Media, 2007.

DUCHEYNE, E. I.; DE WULF, R. R.; DE BAETS, B. A spatial approach to forest-management optimization: linking GIS and multiple objective genetic algorithms. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 8, p. 917-928, 2006.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; DE FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Assessing the growth gaps of Eucalyptus plantations in Brazil–Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117464, 2019.

FARDIN, L. P. **Sistema de suporte à decisão no planejamento florestal estratégico**. 2019. 107f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Pesquisa Operacional para Cursos de Administração, Contabilidade e Economia**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2012.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. da. **Formação de povoamentos florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 109 p.

FERREIRA, J. M. de A.; STAPE, J. L. Productivity gains by fertilization in Eucalyptus urophylla clonal plantations across gradients in site and stand conditions. **Southern Forests**, v. 71, n. 4, p. 253-258, 2009.

FLISBERG, P.; LIDÉN, B.; RÖNNQVIST, M. A hybrid method based on linear programming and tabu search for routing of logging trucks. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 4, p. 1122-1144, 2009.

FOTAKIS, D. G.; SIDIROPOULOS, E.; MYRONIDIS, D.; IOANNOU, K. Spatial genetic algorithm for multi-objective forest planning. **Forest Policy and Economics**, v. 21, p. 12-19, 2012.

GARLET, J.; COSTA, E. C. Plantas daninhas e seus efeitos no ataque de pragas e no crescimento de plantas de eucalipto. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 57, n. 3, p. 280-286, 2014.

GARLET, J.; COSTA, E. C.; BOSCARDIN, J.; MACHADO, D. N.; PEDRON, L. Fauna de Coleoptera edáfica em eucalipto sob diferentes sistemas de controle químico da matocompetição. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 239-248, 2015.

GOMIDE, L. R. Planejamento florestal espacial. Curitiba. 2009. 256f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2009.

HAJDU, M. Survey of precedence relationships: Classification and algorithms. **Automation in Construction**, v. 95, p. 245-259, 2018.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E. **Practical genetic algorithms**. New York: Wiley, 1998.

HERROELEN, W.; DEMEULEMEESTER, E.; DE REYCK, B. A classification scheme for project scheduling. In: **Project scheduling**. Springer, Boston, MA, 1999. p. 1-26.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.** MIT press, 1975.

IBGE. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2020_v35_informativo.pdf>. Acesso em 18 nov. 2021.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives—discussion and synthesis. **Forest Science**, v. 23, n. suppl_1, p. a0001-z0001, 1977.

JOHNSTON, D. R.; GRAYSON, A. J.; BRADLEY, R. T. **Planeamento florestal.** Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 1977, 798 p.

KERZNER, H. **Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling.** John Wiley & Sons, 2017.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

KUTER, S.; WEBER, G.-W.; AKYÜREK, Z. A progressive approach for processing satellite data by operational research. **Operational Research**, v. 17, n. 2, p. 371–393, 30 jul. 2017.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel.** Elsevier, 2004.

LAROZE, A. J.; GREBER, B. J. Using tabu search to generate stand-level, rule-based bucking patterns. **Forest Science**, v. 43, n. 2, p. 157-169, 1997.

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

LOBATO, C. A. P. **Seletividade e efeito residual de herbicidas pré-emergentes aplicados na presença e ausência de resíduos florestais em plantação de eucalipto**. 2016. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Recursos Florestais). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016.

LOCKWOOD, C.; MOORE, T. Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. **Canadian journal of forest research**, v. 23, n. 3, p. 468-478, 1993.

LONDERO, E. K.; SCHUMACHER, M. V.; RAMOS, L. O. O.; RAMIRO, G. A.; SZYMCZAK, D. A Influência de diferentes períodos de controle e convivência de plantas daninhas em eucalipto. **Cerne**, v. 18, p. 441-447, 2012.

LUKE, S. **Essentials of Metaheuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes**. (Online Version 1.1). Department of Computer Science, George Mason University, 2011, 235 p.

MALAQUIAS, N. G. L. Uso dos algoritmos genéticos para a otimização de rotas de distribuição. 2006. 113f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, 2006.

MENDONÇA, N de P. Aplicação do método simulated annealing em um problema de sequenciamento das atividades silviculturais. Lavras, MG: UFLA, 2016. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, 2016.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + Data structures = evolution programs**. USA. Springer. 1996. 388p.

MONTEVECHI, J. A.; TURRIONI, J. B.; ALMEIDA, D. A.; MERGULHÃO, R. C.; LEAL, F. Análise comparativa entre regras heurísticas de sequenciamento da produção aplicada em job shop. **Revista Produto e Produção**, v.6, n.2, p. 12-18, 2002.

MOURA, A. L. de M. Planejamento anual otimizado de atividades silviculturais com restrição de recursos e múltiplos modos de execução. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

OSMASTON, F.C. **The management of forests**, London, George Allen and Unwm, 1968. 384p.

PEREIRA, F. C. M.; ALVES, P. L. da C. A. Herbicides for weed control in eucalypt. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.14, n.4, p.333-347. 2015.

PITELLI, R. A. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. **Série Técnica IPEF**, v.4, p.1-24, 1987.

PUETTMANN, K. J.; COATES, K. D.; MESSIER, C. C. **A critique of silviculture: managing for complexity**. Washington; Island press. 2009.

QUEIROZ, L. M. O. **Algoritmos genéticos híbridos para redução de perdas técnicas em redes primárias de distribuição considerando variações de demandas**. Campinas. 2005. 81f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

REEVES, C. R. Genetic Algorithms. p.55-82. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. (Eds.) **Handbook of metaheuristics**. Kluwer. 2003. p.557.

RICHARDS, E. W.; GUNN, E. A. A Model and tabu search method to optimize stand harvest and road construction schedules. **Forest Science**, v. 46, n. 2, p. 188-203, 2000.

RODE, R. **Planejamento da produção florestal em propriedades rurais**. 2014. 120f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 2014.

RODE, R.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; BINOTI, D. H. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SOUZA, A. L.; SILVA, M. L.; COSENZA, D. N. Comparação da regulação florestal de projetos de fomento com áreas próprias de empresas florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 81, p. 11-19, 2015.

RODRIGUES, F. L. **Regulação de florestas equiâneas utilizando programação linear**. 1997. 117f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 1997.

RODRIGUES, F. L. **Metaheurística e sistema de suporte à decisão no gerenciamento de recursos florestais**. 2001. 239f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2001.

RODRIGUES, F. L.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. D. N.; SOUZA, A. L. Solução de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando Busca Tabu. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 701-713, 2003.

RODRIGUES, F. L.; SILVA, G. F. D.; 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, p. 769-778, 2006.

RÖNNQVIST, M. Optimization in forestry. **Mathematical Programming**, v. 97, n. 1-2, p. 267-284, 2003.

SALAMON, P.; SIBANI, P.; FROST, R. **Facts, conjectures, and improvements for simulated annealing**. Siam, Philadelphia, 2002.

SALO, S.; TAHVONEN, O. On the optimality of a normal forest with multiple land classes. **Forest Science**, v. 48, n. 3, p. 530-542, 2002.

SANTOS, A. C DE A. **Modelagem matemática para planejamento operacional integrado das atividades de colheita, baldeio e transporte**. 2019. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SILVA, M. L. da; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. **Economia florestal**. UFV, 2005.

SILVA, G. F. D.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L. D.; RODRIGUES, F. L.; SANTOS, H. D. N. Problemas com o uso de programação linear com posterior arredondamento da solução ótima, em regulação florestal. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 677-688, 2003.

SIVANANDAM S. N.; DEEPA S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; JACOB, W. S.; TAKAHASHI, E. N. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in Eucalyptus plantations at landscape scales in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 223, n. 1-3, p. 358-362, 2006.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA R. C.; SILVA S. R.; HAKAMADA R. E.; FERREIRA J. M. DE A.; LIMA A. M. N.; GAVA J. L.; LEITE F. P.; ANDRADE H. B.; ALVES J. M.; GUALTER G. C. SILVA AZEVEDO, M. R. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.

TARP, P.; HELLES, F. Spatial optimization by simulated annealing and linear programming. **Scandinavian journal of forest research**, v. 12, n. 4, p. 390-402, 1997.

TOLEDO, R. E. B.; VICTORIA FILHO, R.; PITELLI, R. A.; ALVES, P. L. C. A.; LOPES, M. A. F. Efeito de períodos de controle de plantas daninhas sobre o desenvolvimento inicial de plantas de eucalipto. **Planta Daninha**, v.18, p.395-404, 2000.

TOMPPO, E.; HALME, M. Using coarse scale forest variables as ancillary information and weighting of variables in k-NN estimation: a genetic algorithm approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, n. 1, p. 1-20, 2004.

TUBINO, D. F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. São Paulo: Atlas, 1997.

VAFIAIE, H.; DE JONG, K. 1992, "Genetic algorithms as a tool for feature selection in machine learning," in Proceedings of the International Conference on Tools with AI, Arlington, VA. IEEE Society Press, p. 200 – 204.

VAN COILLIE, F. M. B.; VERBEKE, L. P. C.; DE WULF, R. R. Feature selection by genetic algorithms in object-based classification of IKONOS imagery for forest mapping in Flanders, Belgium. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, n. 4, p. 476-487, 2007.

VETTORAZZI, C. A.; FERRAZ, S. F. de B. Silvicultura de precisão: uma nova perspectiva para o gerenciamento de atividades florestais. In: BORÉM, A.; GIUDICE, M. P.; QUEIRÓZ, D. M. de; et al. **Agricultura de Precisão**. Viçosa: Editora UFV, 2000.

VICTORINO, I. R. S. **Otimização de um reator industrial de produção de álcool cíclico utilizando algoritmos genéticos**. Campinas. 2005. 527f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

WERNEBURG, M. A. P. Planejamento em grandes empresas florestais no Brasil. Diamantina, MG: UFVJM, 2015. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, MG, 2015.

ZANETTI, R.; ZANUNCIO, J. C.; MAYHÉ-NUNES, A. J.; MEDEIROS, A. G. B.; SOUZA-SILVA, A. Combate sistemático de formigas-cortadeiras com iscas granuladas, em eucaliptais com cultivo mínimo. **Revista Árvore**, v. 27, p. 387-392, 2003.

CAPÍTULO II

APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO NO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS E TAREFAS

INTRODUÇÃO

Problemas com restrição de recursos e sequenciamento de atividades tem grande importância quando se trata de otimizar o tempo e a alocação dos recursos. Eles têm a atenção não apenas da ciência, mas setores empresariais tem interesse devido à complexidade desse tipo de problema e diversidade de alternativas geradas para tomada de decisão. Problemas como esse são conhecidos como problemas combinatoriais. Teoricamente a solução ótima pode ser encontrada pela enumeração de todas as soluções possíveis, mas na prática, essa enumeração é praticamente impossível devido à alta complexidade dos problemas reais (GAREY e JOHNSON, 1975).

O objetivo da programação de projetos é programar as atividades a fim de otimizar um ou mais critérios, de modo que as relações de precedência entre as atividades e a disponibilidade de recursos sejam respeitadas (YAMASHITA e MORABITO, 2007). Assim, a programação é entendida como a alocação de recursos no tempo, aplicada quando se deseja aumentar a eficiência dos processos.

No caso do setor silvicultural, máquinas podem falhar, trabalhadores podem não estar disponíveis, insumos podem faltar, ferramentas e outros recursos podem estar fora do alcance das áreas fins, em algum momento. À medida em que o detalhamento do planejamento vai aumentando em direção ao nível operacional, estas incertezas vão diminuindo progressivamente (GUNN, 2005).

Alguns trabalhos sugerem que as mudanças nos custos de mão-de-obra e nos preços dos combustíveis desempenham um papel importante nas mudanças dos custos das práticas florestais (MOAK 1982, STRAKA et al. 1992, BAIR E ALIG 2007). Mudanças nos custos associados à prática da silvicultura, frequentemente se correlacionam com as mudanças nos custos de mão-de-obra e combustível (WATSON et al., 1987). Um detalhamento de custos foi incluído para cada prática, e o resultado sugeriu que a mão-de-obra era repetidamente o componente de custo mais significativo para muitas ou a maioria das práticas (MOAK et al. 1980).

Visto a importância da mão-de-obra na composição de custos das práticas silviculturais e, sendo assim, buscando otimizar a alocação deste recurso, este estudo propôs um modelo para o problema da alocação da mão-de-obra em plantios de eucalipto, com o objetivo de minimizar a soma de horas por hectare trabalhadas em um conjunto de práticas silviculturais.

MATERIAL E MÉTODOS

O problema estudado está relacionado ao planejamento operacional semanal das atividades silviculturais a serem executadas em talhões de eucalipto. Esse planejamento deve estar alinhado ao planejamento estratégico da empresa. A elaboração do planejamento das atividades silviculturais deve reunir informações sobre o histórico das atividades já realizadas nos talhões e sobre os intervalos entre as atividades, dados operacionais das equipes de campo com informações sobre os rendimentos, e a identificação da quantidade de recursos disponíveis para a realização das atividades silviculturais (FIGURA 1). Os recursos disponíveis estão relacionados à demanda por mão-de-obra para realizar as atividades no intervalo de tempo definido e a regulação da quantidade de mão-de-obra permite eliminar ou reduzir a flutuação dessa demanda, mantendo o número de trabalhadores para essa função constante o ano todo.

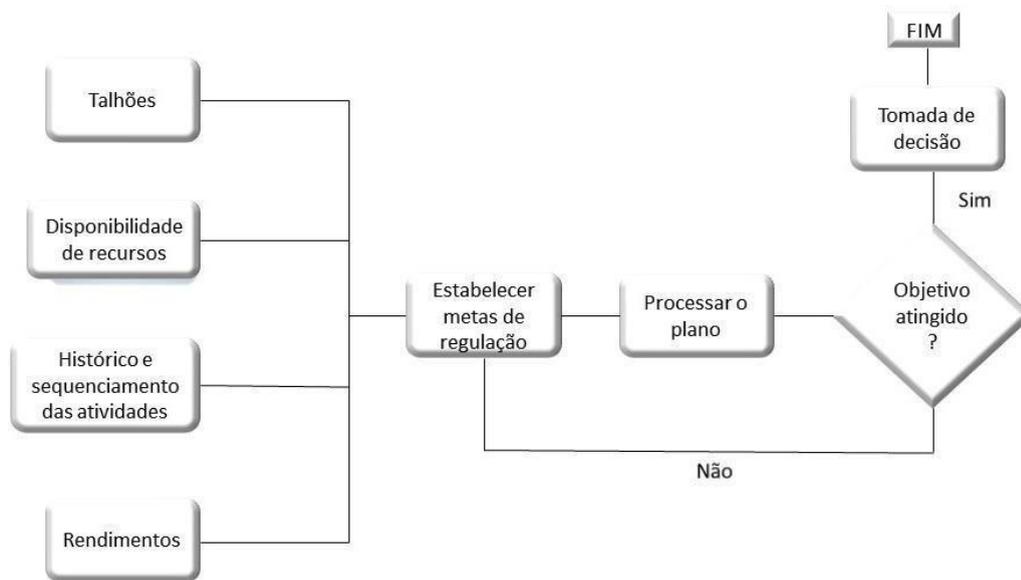


Figura 1 – Fluxograma do processo de planejamento das atividades silviculturais. Adaptado de Moura, 2013.

Descrição do problema

Os dados utilizados neste estudo foram oriundos de uma empresa do setor florestal localizada em Minas Gerais. As informações sobre as atividades silviculturais realizadas nas áreas de plantio em diferentes fases, com suas respectivas informações de rendimento por trabalhador e de equipamento por hectare foram retirados de uma base de dados, modificados e adaptados para esse estudo.

Foram extraídos os rendimentos médios por atividade apenas de uma região, e a diferenciação entre os trabalhadores nas atividades manuais e mecânicas (máquina + trabalhador) foi feita variando para mais ou para menos o rendimento a partir do valor médio. A sequência e intervalos entre as atividades também foi com base no histórico de dados da empresa. Os dados e informações foram utilizadas para iniciar o processo de construção do modelo.

Os talhões foram diferenciados de acordo com a fase do plantio, em reforma e 1ª manutenção. A reforma consiste na substituição completa do antigo plantio por um novo plantio de mudas. As operações são iniciadas semanas antes do plantio das mudas, com o combate a formiga e o preparo do solo. A fase da 1ª manutenção, envolve uma quantidade menor de atividades, visto que o plantio já está estabelecido e precisa ser monitorado (TABELA 1).

O problema foi caracterizado por minimizar a soma dos rendimentos em hora / hectare dos trabalhadores. Um conjunto de trabalhadores (1,...,m) foram designados para realizar as atividades de 1 a n, nas semanas de 1 a o, nos talhões de 1 a p, em que são definidos:

Tempo de execução: é o tempo necessário para realizar uma atividade y;

Data de início: representa o período inicial da atividade;

Data final: é a última data em que a atividade deve ser finalizada;

Peso da restrição: representa um fator de prioridade, que denota a prioridade ao cumprimento de uma restrição em relação às demais.

A geração das alternativas respeitou o sequenciamento das atividades e o período necessário para a transição de uma atividade para outra (TABELA 1).

Tabela 1 - Atividades envolvidas nas fases de reforma e 1ª manutenção do plantio selecionadas para esse projeto.

Fase do plantio	Atividade	Sequência	Semana
Reforma	Combate Formiga em Reserva/Defesa - I	1	-8
Reforma pré-plantio	Capina química mecânica total	2	-4
Reforma	Combate formiga sistemático	3	-4
Reforma	Alinhar/marcar (encosta)	4	-3
Reforma	Subsolagem/adubação	5	-3
1ª Manutenção	Adubação manual Cobertura - 2ª Dose	20	49
1ª Manutenção	Capina química manual total pós-plantio – II	21	49
1ª Manutenção	Roçada manual pós-plantio - II	22	51
1ª Manutenção	Adubação mecânica Cobertura - 2ª Dose	23	53

As atividades das diferentes fases são independentes entre si, pois elas são realizadas em talhões independentes e que se apresentam em fases distintas dentro do mesmo período. As atividades apresentam uma relação de precedência do tipo término-início e a próxima atividade só inicia quando a anterior finalizar, dentro de um mesmo talhão. Os valores negativos na coluna semana significam que a atividade deve ser realizada antes do plantio (marco zero), e os valores positivos, após o plantio.

Outra premissa considerada: todos os trabalhadores estão aptos e treinados a realizarem quaisquer atividades denominadas acima (TABELA 1), e apresentam rendimentos distintos entre si e entre as atividades. Os rendimentos dos trabalhadores foram definidos em horas homem/hectare e das máquinas + homem em horas máquina + homem/hectare, a partir desses rendimentos foi calculada a área por semana que é feita por cada trabalhador em cada

atividade.

Sendo assim, o problema abrangeu um total de cinco talhões, três em fase de reforma e dois em fase de 1ª manutenção; 9 atividades e 10 trabalhadores, em um horizonte de planejamento de 10 semanas.

As atividades iniciais podem ser entendidas como a próxima atividade a ser realizada a partir da última atividade realizada em cada talhão (TABELA 2). Para o talhão 1, as atividades iniciam do combate a formiga em Reserva/Defesa, seguida da capina química mecanizada total pré-plantio, pelo combate a formiga sistemático, alinhamento e marcação em encosta e subsolagem/adubação. Os talhões 1, 2 e 3 apresentam a mesma sequência de atividades, porém os talhões 2 e 3 iniciam nas atividades capina química mecanizada total pré-plantio e combate formiga sistemático, respectivamente.

O talhão 4 inicia na adubação manual de cobertura - 2ª Dose, seguido das atividades de capina química manual total pós-plantio – II, roçada manual pós-plantio – II e adubação mecânica de cobertura - 2ª Dose. O talhão 5 tem a mesma sequência, iniciando da atividade de capina química manual total pós-plantio – II (Tabela 2).

Tabela 2 - Situação operacional dos talhões selecionados e área totais dos talhões.

Talhões	Área (ha)	Atividade inicial
1	51,00	Combate Formiga em Reserva/Defesa - I
2	37,00	Capina química mecânica total pré-plantio
3	36,00	Combate formiga sistemático
4	14,00	Adubação manual Cobertura - 2ª Dose
5	13,80	Capina química manual total pós-plantio - II

Pressupostos

- Todos os trabalhadores estão aptos a realizar quaisquer atividades e possuem rendimentos distintos entre si;
- Cada trabalhador deve executar apenas uma atividade dentro da semana;
- Todos os talhões referentes à mesma fase de plantio possuem a mesma sequência de atividades a serem realizadas, mas iniciam em atividades distintas;
- O sequenciamento das atividades foi implementado na escrita da função de aptidão (*fitness*), as atividades apresentaram alternativas de execução respeitando o espaço de tempo necessário entre a realização de uma atividade e sua sucessora.

O modelo foi implementado em linguagem *Visual Basic for Applications*® no software Microsoft Excel. As soluções geradas apresentam-se em formato de vetor, em que a variável de decisão X_{iyzt} simboliza a alternativa de trabalhador i , atividade y , semana z e talhão t e a codificação das alternativas forma um vetor de opções binárias, em que 0 no vetor indica que a alternativa correspondente deve ser omitida e 1 que deve ser incluída.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelo

Função de aptidão (*fitness*)

O modelo de otimização teve a função de minimizar a soma das horas por hectare (h/ha) trabalhadas nas atividades do projeto. As restrições foram incluídas como penalidades na função, e seus pesos representados por α , β , ϕ :

$$\text{Min} = \sum_{i=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^o \sum_{t=1}^p r_{iyzt} X_{iyzt} + \alpha \left(m - \sum_{i=1}^m \sum_{z=1}^o X_{iz} \right) +$$

$$\beta \left(A_t - \sum_{i=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^o \sum_{t=1}^p R_{iy} X_{iyzt} \right) + \phi \left(\sum_{i=1}^o \sum_{z=1}^o (X_{iz+1} - X_{iz}) \right)$$

Pode-se então desmembrar a função:

Restrição de trabalhador

Todos os trabalhadores devem trabalhar toda semana. Se a diferença entre o número total de trabalhadores e o número de trabalhadores designados naquela semana for maior ou menor do que zero, o modelo é penalizado. Representada no modelo como:

$$\alpha \left(m - \sum_{i=1}^m \sum_{z=1}^o X_{iz} \right)$$

- A designação de cada trabalhador em cada semana deve ser selecionada, e caso não ocorra o modelo será penalizado.

$$\phi\left(\sum_{i=1}^m \sum_{z=1}^o (X_{iz+1} - X_{iz})\right)$$

Restrição de área

A restrição de área determina que a soma das áreas realizadas de cada atividade se aproxime das áreas dos talhões. Caso a soma da área executada da atividade diferencie da área total do talhão, a função é penalizada.

$$\beta\left(A_t - \sum_{i=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^n \sum_{t=1}^n R_{iy} X_{iyzt}\right)$$

Restrição binária

Os valores da variável decisória pertencem a um conjunto com os elementos zero e um, eles assumem apenas esses valores.

$$X_{iyzt} \in \{0,1\}, \quad \forall i, y, z, t$$

r_{iyzt} - Rendimento em horas por hectare do trabalhador i , atividade y , semana z e talhão t ;

R_{iy} - Rendimento em hectares por semana do trabalhador i na atividade y ;

X_{iyzt} - Variável binária (0 ou 1) de decisão, referente ao trabalhador i , atividade y , semana z , talhão t ;

A_t - Área total do talhão

m - Número total de trabalhadores;

n - Número total de atividades;

o - Número total de semanas;

p - Número total de talhões.

O pseudocódigo está escrito a seguir:

População

Inicia $N = 0$

Fazer até $N \geq$ número de soluções que você quer testar

solução inicial aleatória (filho)

Seleciona (Solução ótima)

Avalia solução (função objetivo)

Substitui os pais para cruzamento

Cruzamento

Inicia $N = 0$

Fazer até $N \geq$ número de soluções que você quer testar

Seleciona aleatoriamente pai1

Seleciona aleatoriamente pai2

Evolução

- Aplica o crossover (com $\text{prob} = p$)

- Aplica mutação (com $\text{prob} = p'$)

Saída: Seleciona o elhor indivíduo presente na geração final.

Primeiramente, foi respeitada a sequência das atividades com relação à precedência entre elas, isso foi incluído na estrutura do modelo, a montagem do modelo exclui as alternativas inviáveis com relação a essas precedências. O modelo gerou 1.280 variáveis decisórias, essas variáveis foram combinadas de maneira que as penalidades das restrições não atendidas fossem minimizadas, assim como a função de aptidão como um todo.

A população inicial foi gerada pelo processo de randomização, preenchendo todos os *loci* com valores binários (0 ou 1). A randomização e os códigos binários são comumente usados na geração de soluções iniciais no AG (MITCHELL, 1996; MICHALEWICZ, 1996; MITSUO e CHENG, 2000, RODRIGUES et al., 2006). A população inicial foi composta por 50 indivíduos gerados aleatoriamente e o *crossover* foi realizado em múltiplos pontos a uma

taxa de 10% e a mutação a uma taxa de 5%, o critério de parada foi definido pela quantidade de ciclos. As alternativas selecionadas foram organizadas e representadas pelo código X “número atividade” + “número trabalhador”, por exemplo, o código X01_1 representa a atividade um, realizada pelo trabalhador um (TABELA 3), as colunas representam as semanas e as linhas representam os talhões.

Tabela 3 – Sequenciamento das atividades dentro de cada talhão distribuídas durante as semanas

Talhão	Semanas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
00681-005	X01_1									
00681-005	X01_2									
00681-005								X04_2		
00681-005							X03_3			
00681-005										X05_3
00681-005							X03_4			
00681-005								X04_4		
00681-005										X05_4
00681-005							X03_5			
00681-005								X04_5		
00681-005										X05_5
00681-005	X01_6									
00681-005								X04_6		
00681-005	X01_7									
00681-005							X03_7			
00681-005								X04_7		
00681-005	X01_8									
00681-005								X04_8		
00681-005										X05_8
00681-005						X02_9				
00681-005								X04_9		
00681-005	X01_10									
00681-005								X04_10		
00681-006				X04_2						
00681-006		X03_3								
00681-006		X03_4								
00681-006				X04_4						
00681-006		X03_5								
00681-006				X04_6						
00681-006				X04_7						
00681-006				X04_8						
00681-006					X05_8					
00681-006	X02_9									
00681-006				X04_9						
00681-006					X05_9					
00681-006				X04_10						

00681-006			X05_10	
00681-007			X05_1	
00681-007	X03_3			
00681-007			X05_3	
00681-007		X04_1		
00681-007		X04_2		
00681-007		X04_4		
00681-007		X04_5		
00681-007	X03_4			
00681-007	X03_5			
00681-007		X04_7		
00681-007			X05_5	
00681-007		X04_8		
00681-007		X04_9		
00681-007		X04_10		
00663-039	X20_1			
00663-039	X20_2			
00663-039			X21_2	
00663-039				X22_2
00663-039			X21_3	
00663-039				X22_3
00663-039			X21_4	
00663-039	X20_6			
00663-039			X21_6	
00663-039				X22_6
00663-039	X20_7			
00663-039				X22_7
00663-039				X22_8
00665-001			X22_1	
00665-001			X22_3	
00665-001			X22_4	
00665-001		X21_6		
00665-001			X22_6	
00665-001			X22_7	
00665-001				X23_6
00665-001	X21_8			
00665-001	X21_9			
00665-001	X21_10			

A inclusão de penalidades na função de aptidão é um método empregado para direcionar o algoritmo na busca de soluções, para que o modelo consiga convergir para a melhor solução (GOMIDE, 2009). O valor da função de aptidão penalizada representa quantitativamente a amplitude da violação da restrição e proporciona uma avaliação da qualidade de cada solução

(PEZESHK e CAMP, 2002). As soluções com as piores funções de aptidão são substituídas até atingir o critério de parada do algoritmo.

A melhor solução encontrada pelo algoritmo, de acordo com os parâmetros estabelecidos tanto de seleção, mutação, recombinação, quanto de parada do algoritmo, foi a que obteve a menor função de aptidão dentre aquelas exploradas. A solução encontrada como a melhor distribuiu os trabalhadores nas atividades de forma que alguns trabalhadores não foram designados em algumas semanas (FIGURA 2), apresentando uma possibilidade de reorganização do trabalho e alocação desses trabalhadores em outras atividades. Isso ocorre por que em algumas situações não existe alternativa a ser realizada pelo trabalhador naquelas condições, ou devido ao critério de parada utilizado no processamento do algoritmo, que não permitiu processar o tempo suficiente para achar uma solução que designa todos os trabalhadores disponíveis. O ideal na prática seria todos os trabalhadores trabalhem todas as semanas dentro do horizonte do planejamento de curto prazo, para otimizar o tempo e a distribuição do trabalho, mas existem semanas em que todos os trabalhadores tem atividades a desenvolverem e tem semanas em que, devido à organização das atividades e seus intervalos, não houve alocação de todos os trabalhadores em atividades desse projeto (FIGURA 3).

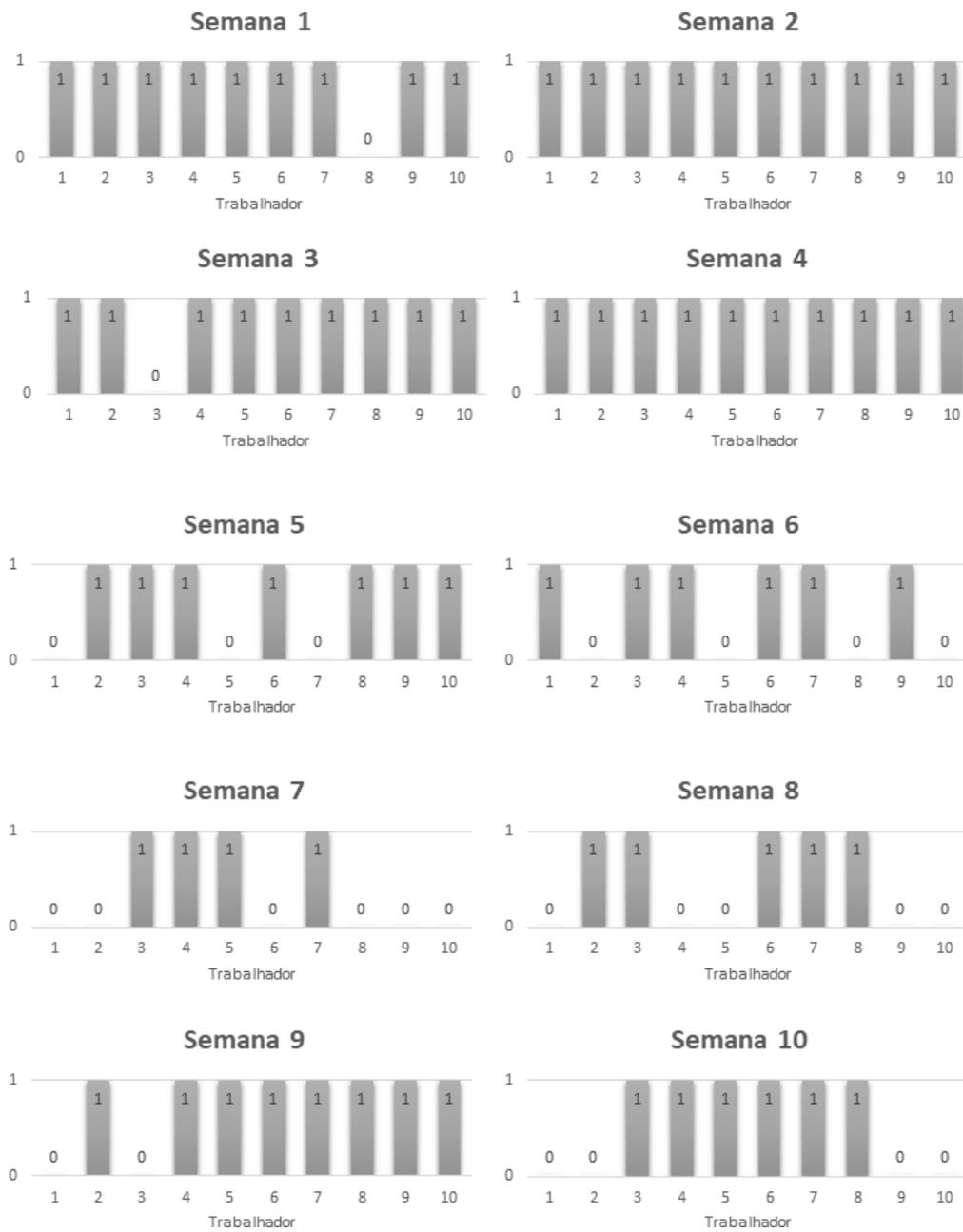


Figura 2 – Seleção dos trabalhadores para as atividades do projeto dentro de cada semana.

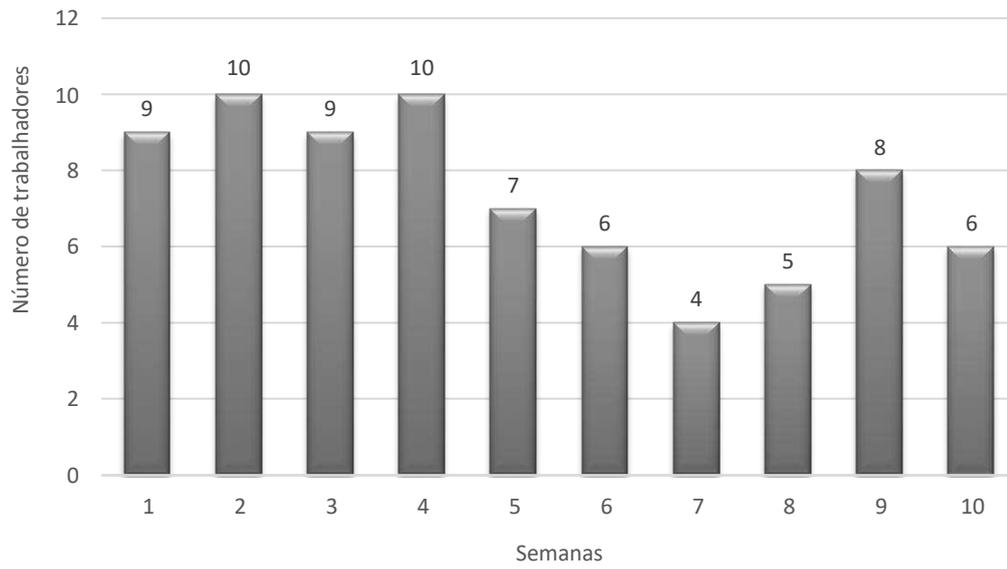


Figura 3 - Regulação do número total de trabalhadores por semana que forem designados a realizar uma das atividades do projeto.

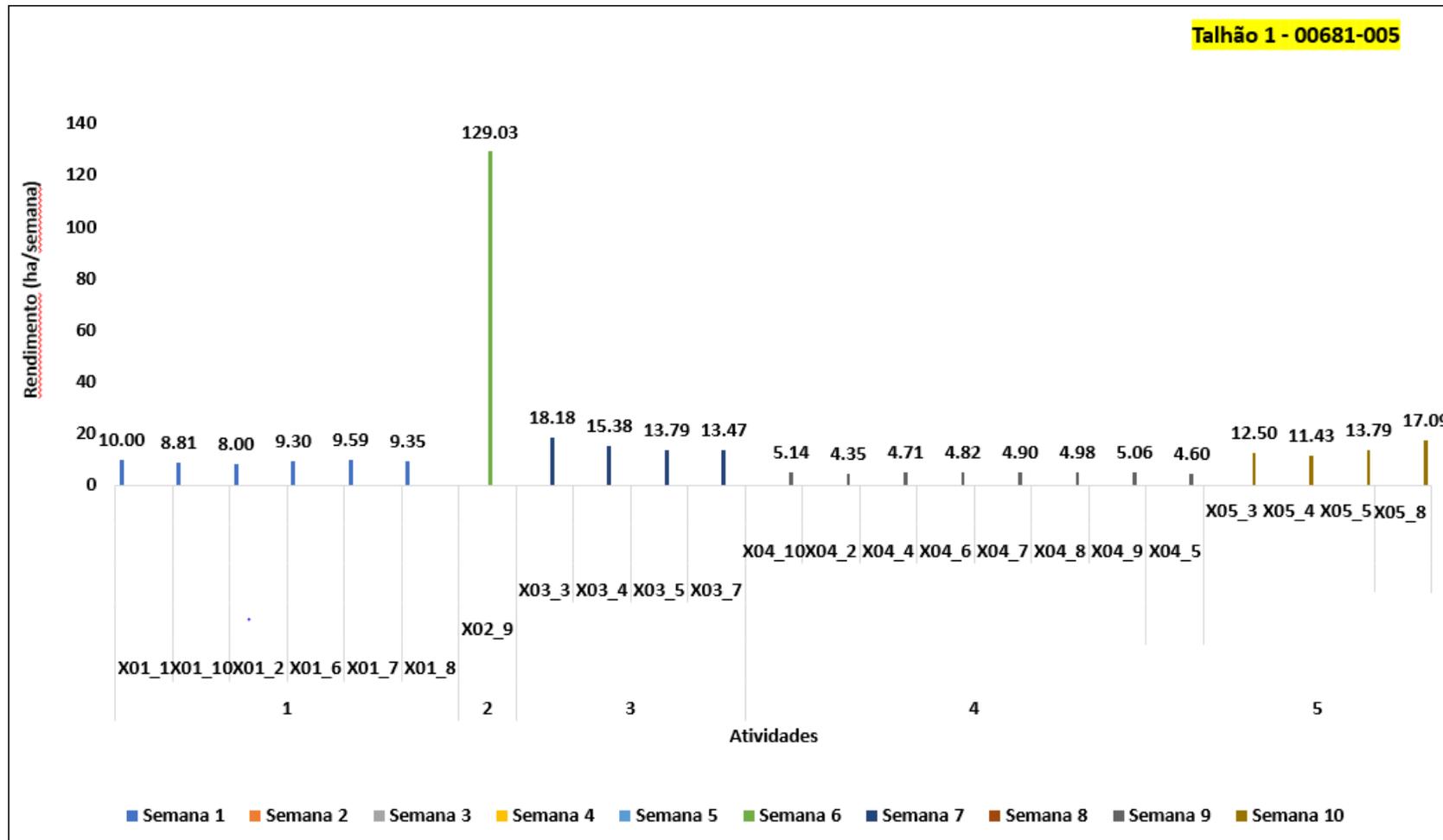


Figura 4 – Seleção das variáveis e seus rendimentos para o talhão 1 (00681-005).

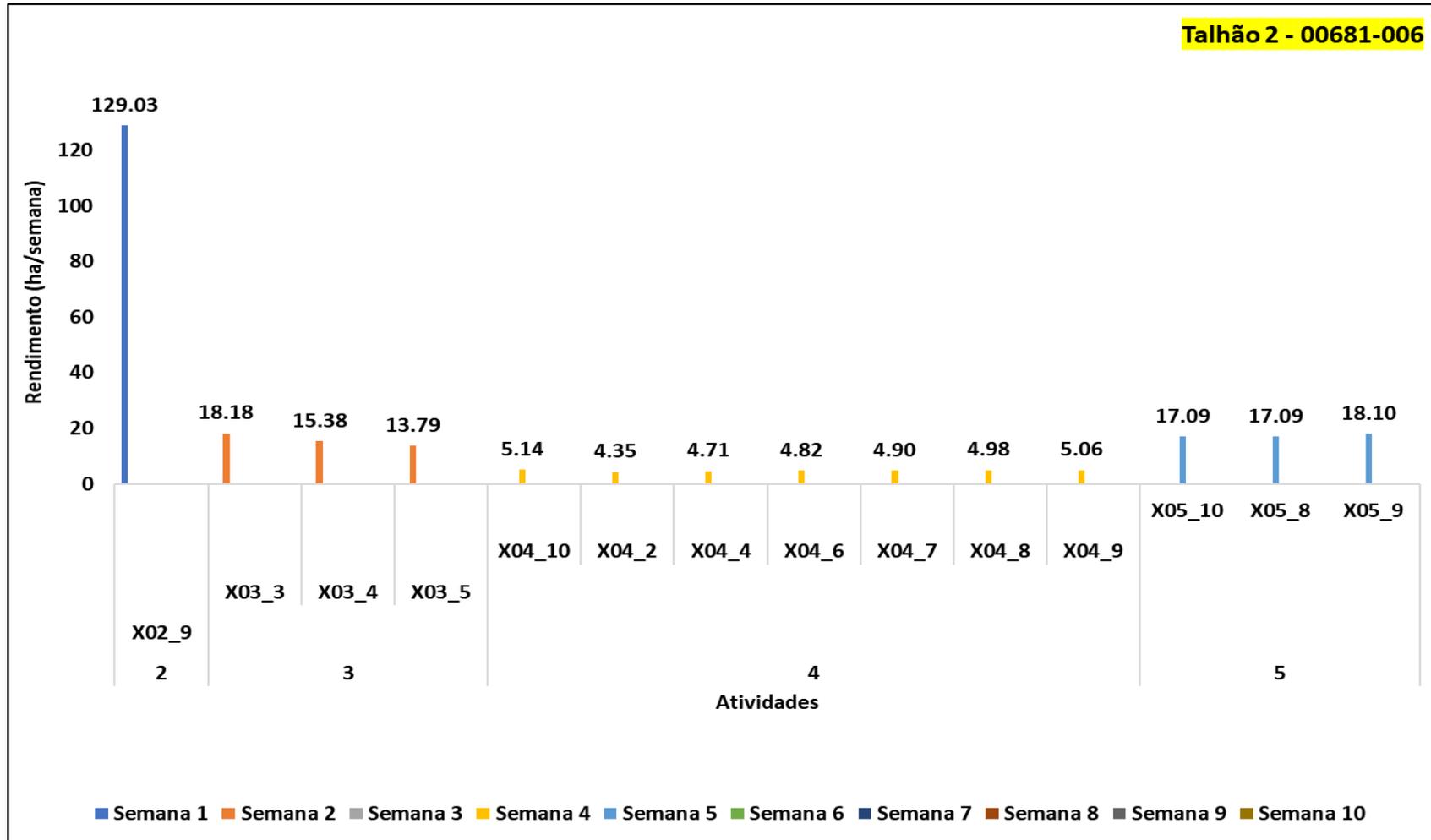


Figura 5 – Seleção das variáveis e seus rendimentos para o talhão 2 (00681-006).

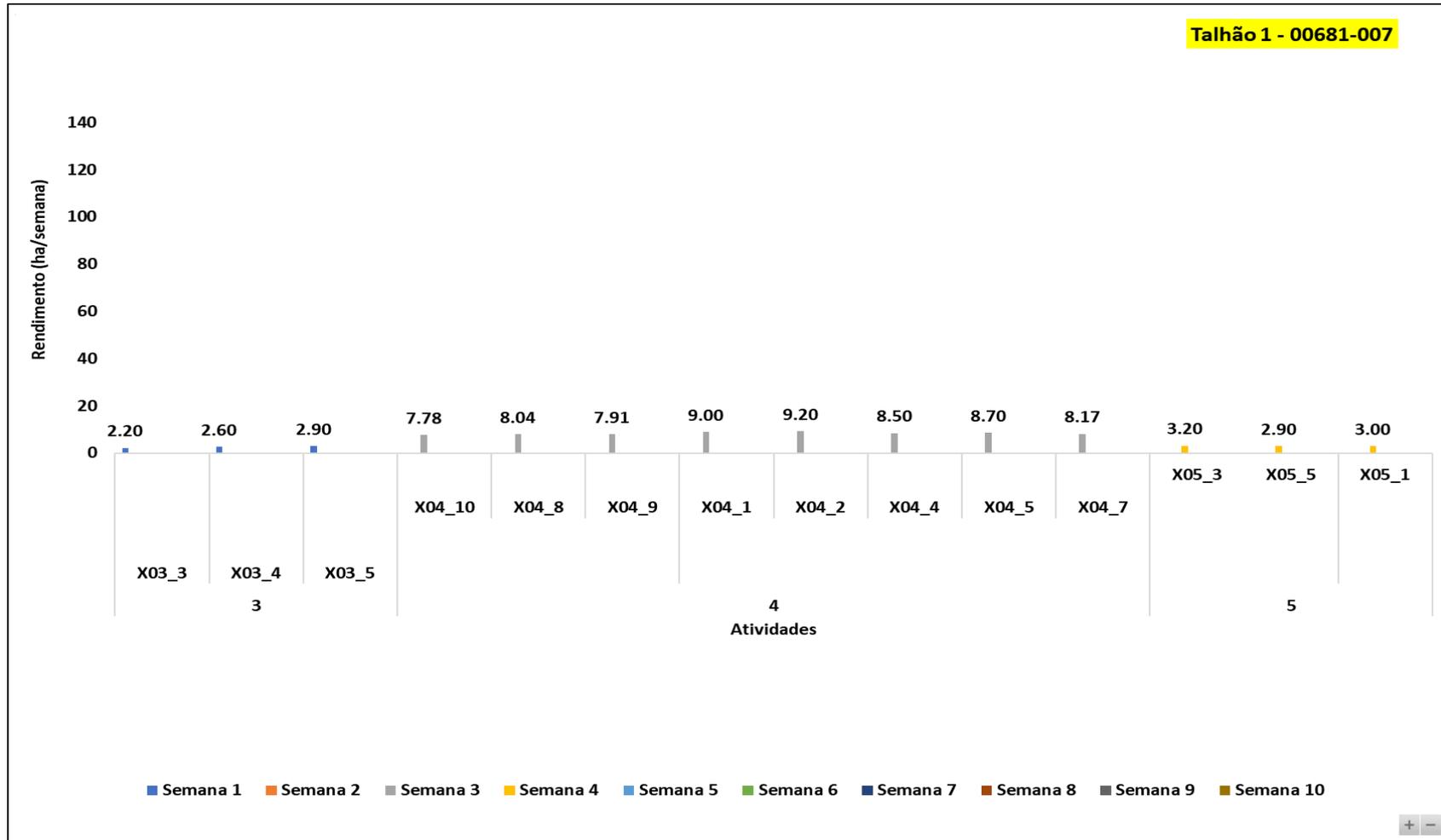


Figura 6 – Seleção das variáveis e seus rendimentos para o talhão 3 (00681-007).

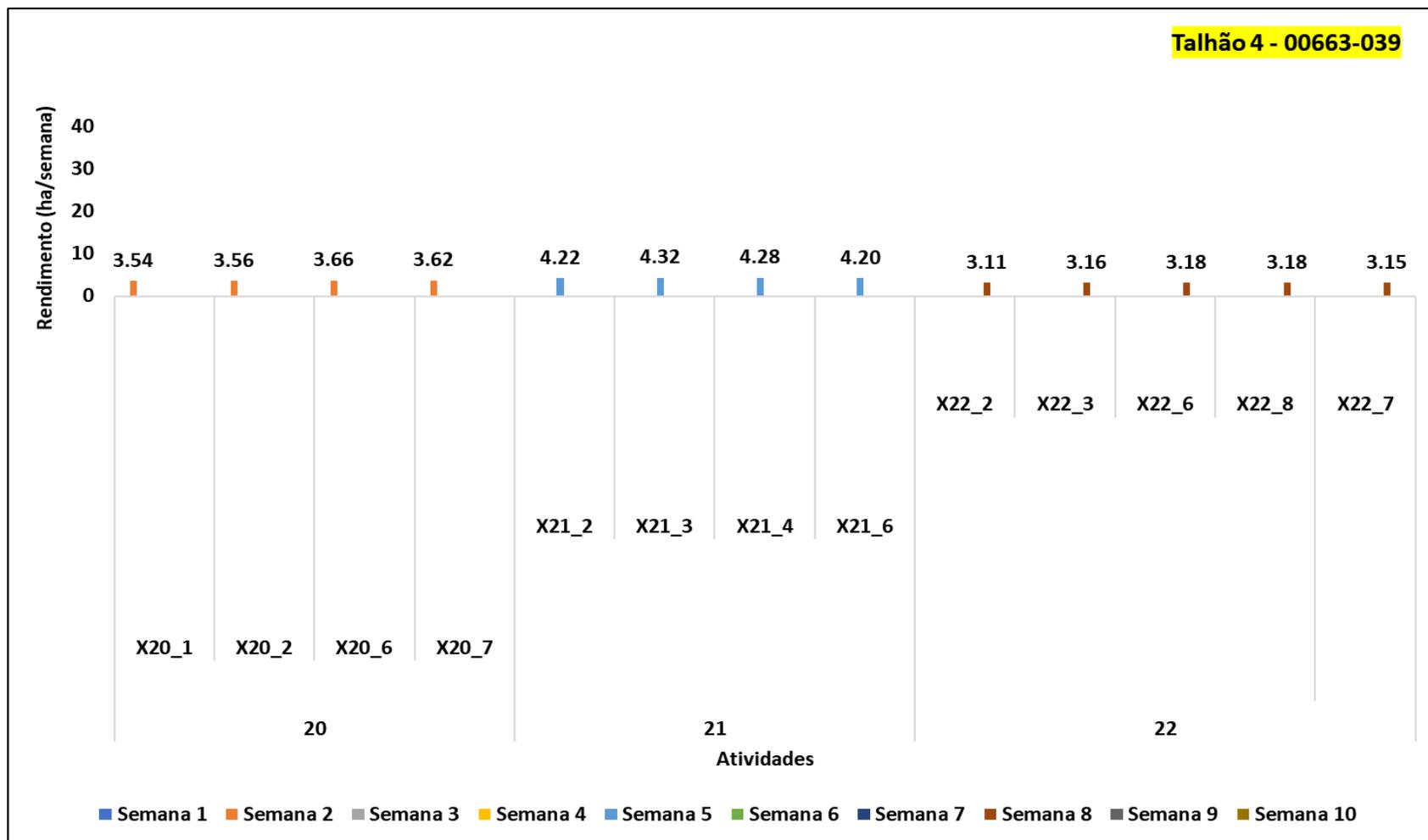


Figura 7 – Seleção das variáveis e seus rendimentos para o talhão 4 (00663-039).

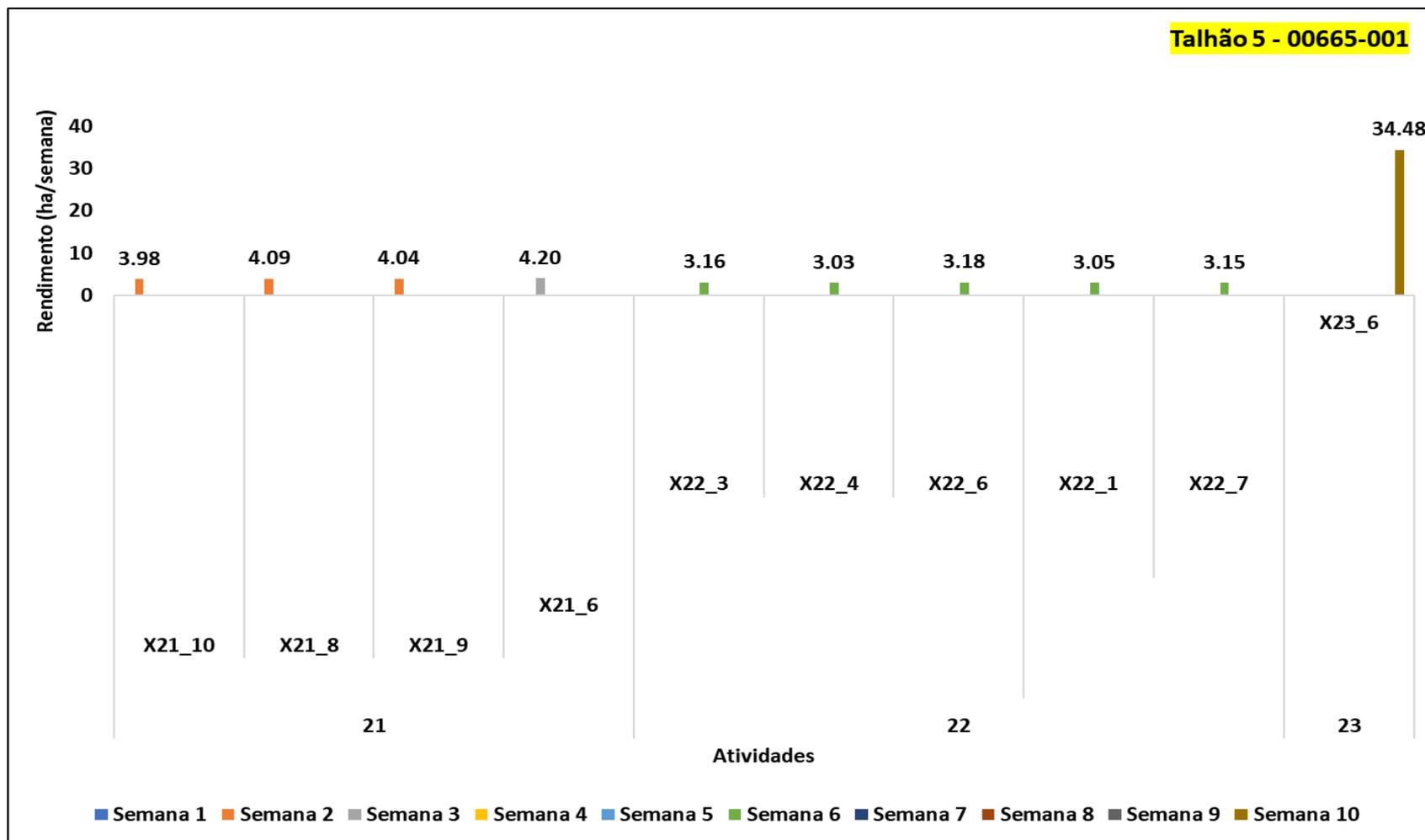


Figura 8 – Seleção das variáveis e seus rendimentos para o talhão 5 (00665-001).

No talhão 1, com a lista de atividades de 1 a 5 a serem realizadas, os trabalhadores 1, 2, 6, 7, 8 e 10 foram designados para a atividade 1, na semana 1; o trabalhador 9 para a atividade 2 na semana 6; trabalhadores 3, 4, 5 e 7 para a atividade 3 na semana 7; trabalhadores 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 para a atividade 4 na semana 9; e trabalhadores 3, 4, 5, 8 para a atividade 5 na semana 10. A área total realizada da atividade 2 ultrapassa bastante a área do talhão – 51ha – pois é uma atividade realizada por máquina e seu rendimento é muito maior do que das atividades realizadas manualmente e, por ser um problema de designação, considerou o rendimento total no momento da decisão (FIGURA 4).

A atividade 4 não foi totalmente realizada no talhão 2 na semana 4 (FIGURA 5), devido à falta de mão-de-obra disponível para executar essa atividade, pois parte dos trabalhadores estavam realizando essa atividade no talhão 2 e parte estava realizando a atividade 5 no talhão 3. A atividade 4 poderia ser finalizada durante as semanas seguintes, porém o algoritmo não designou dessa maneira. Assim seguiu para os talhões 3, 4 e 5. As áreas destes não deixaram de ser feitas, as atividades foram realizadas completamente nestes talhões.

A distribuição dos trabalhadores para realização das diferentes atividades demonstra que uma solução boa encontrada pelo algoritmo, não necessariamente cumpriu todas as restrições impostas ao modelo. Isso ocorre porque as restrições foram incluídas como penalidades na função de aptidão, o modelo entende que ele pode descumprir as restrições, em detrimento da penalização, essa é uma vantagem e desvantagem ao mesmo tempo do algoritmo genético. É uma desvantagem pois permite ao algoritmo descumprir restrições para fornecer uma solução, e é uma vantagem pois, casos em que o problema não seria solucionado por métodos exatos, é solucionável por algoritmo genético, por ele ser flexível quanto ao cumprimento das restrições.

Não existe a garantia de que qualquer solução ótima local encontrada seja equivalente à solução ótima global. O algoritmo genético, torna a resolução de problemas complexos e com alto número de alternativas, possível de ser resolvido em um tempo de processamento viável, ele não analisa todas as combinações possíveis do problema, pois isso tornaria inviável a resolução, ele trabalha em espaços de busca, e possui mecanismos como a mutação para fugir de ótimos locais e explorar regiões de busca ainda não conhecidos.

Há a possibilidade de reprocessar o plano até que todas as atividades e restrições do modelo sejam contempladas, essa possibilidade é decisiva no planejamento de projetos silviculturais, pois o plano pode sofrer influência das condições do clima, quebra de máquinas, indisponibilidade de mão-de-obra (MOURA, 2013).

CONCLUSÕES

O modelo gerado fornece uma solução viável e aplicável na prática. O modelo pode ser facilmente adaptado às diferentes realidades, com a inclusão de restrições relacionadas a realidade da empresa, restrições de orçamento, caixa, operacional e adjacência.

O modelo pode ser aplicado a atividades de qualquer setor que envolva o sequenciamento de atividades e alocação de recursos e seus rendimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIR, L. S.; ALIG, R. J. **Regional cost information for private timberland conversion and management**. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2007.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. Complexity results for multiprocessor scheduling resource constraints, **SIAM J. Comput**, v. 4, p.397-411, 1975.

GUNN, E. A. ADAPTIVE MANAGEMENT, HIERARCHICAL PLANNING. In: **Systems Analysis in Forest Resources: Proceedings of the 2003 Symposium, October 7-9, 2003, Stevenson, Washington**. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2005.

MOAK, J. E. Forest practices cost trends in the South. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 6, n. 3, p. 130-132, 1982.

MOAK, J. E.; WATSON W. F.; VAN DEUSEN, P. Costs and cost trends for forestry practices in the South. *For. Farm.* v. 39, n. 5, p. 58–63, 1980.

STRAKA, T. J.; DUBOIS, M. R.; WATSON, W. F. Costs and cost component trends of hand and machine tree planting in the southern United States (1952 to 1990). **Tree Planters' Notes**, v. 43, n. 3, p. 89-92, 1992.

WATSON, W. F.; STRAKA, T. J.; BULLARD, S. H. Costs and cost trends for forestry practices in the South. **Faculty Publications**. 1987.

YAMASHITA, D. S.; MORABITO, R. Um algoritmo exato para o problema de programação de projetos com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos. **Pesquisa Operacional**, v. 27, p. 27-49, 2007.

CAPÍTULO III

APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA NO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS E TAREFAS

INTRODUÇÃO

Devido à importância da mão-de-obra no custo da implantação e manutenção de um povoamento florestal, o desenvolvimento de ferramenta que auxilie na alocação otimizada dessa mão-de-obra é essencial para o planejamento florestal, para a tomada de decisão e para o alcance das metas.

A tomada de decisão engloba diferentes níveis hierárquicos da empresa; estratégico, tático e operacional. Cada atividade planejada dentro de uma empresa está associada a um horizonte de planejamento para o alcance das metas estratégicas. É importante considerar que se a gestão de uma floresta está subordinada a um planejamento inflexível, qualquer variação nas circunstâncias, pode-se ter que abandonar todo o planejamento (JOHNSTON et al., 1977).

Os modelos de pesquisa operacional empregados para o gerenciamento florestal, devem ser simples para permitir que se explore as incertezas futuras, mas com estrutura que consiga relacionar corretamente as variáveis incluídas nas análises, é necessário um esforço significativo para entender como integrar os valores das variáveis de interesse para tomada de decisão.

A pesquisa operacional é composta por ferramentas capazes de resolver problemas de otimização de recursos, de localização, roteirização, planejamento e alocação de mão-de-obra (LACHTERMACHER, 2004).

Os modelos determinísticos são aqueles de causa e efeito, a saída do modelo é função das condições iniciais fornecidas. Dentre eles está a programação matemática, que fornece uma solução única independentemente do número de vezes que ela é processada com as mesmas informações. É o caso da programação linear inteira.

A programação linear é uma ferramenta de otimização matemática, que busca maximizar ou minimizar uma função, chamada de função de custo ou função objetivo. Na programação linear, a relação entre as variáveis da função objetivo é linear, assim como a relação das variáveis restritivas. Sendo assim, dois elementos-chave desses modelos são: todos os relacionamentos devem ser quantificáveis e lineares (BETTINGER et al., 2017). A saída, ou solução, para um problema de programação linear fornece uma avaliação quantitativa das atividades de gerenciamento propostas. Explorando as alternativas dentro da programação linear, problemas de designação que necessitem de respostas binárias como “sim” ou “não”, são resolvidos por programação linear inteira. A programação inteira é usada quando faz sentido considerar a disponibilidade de recursos como unidade inteira (YAMASHITA e MORABITO, 2007).

Os estudos sobre o planejamento e otimização das atividades que compõem a silvicultura ainda são escassos (MENDONÇA, 2016) e, sabendo que a mão-de-obra é um de seus custos mais significantes (MOAK 1982, WATSON et al., 1987; STRAKA et al. 1992, BAIR e ALIG 2006), foi proposto um modelo de programação linear inteira, com o objetivo de reduzir a soma das horas gastas por hectare, visando o sequenciamento das atividades silviculturais.

MATERIAL E MÉTODOS

A lista das atividades, as fases em que elas acontecem e a sequência de realização (TABELA 1) foram extraídas de um banco de dados maior e representa um recorte real das atividades silviculturais realizadas em plantios de eucalipto. Foram consideradas cinco atividades realizadas na fase reforma e duas atividades da fase de 1ª manutenção. Foram considerados seis talhões, com áreas variando de 13 a 50 hectares, e suas atividades iniciais foram definidas (TABELA 2) para comporem o projeto.

Tabela 1- Fases do plantio, atividades consideradas no projeto e a sequência em que devem ocorrer

Fase do plantio	Atividade	Sequência
Reforma	Combate Formiga em Reserva/Defesa - I	1
Reforma	Capina quím. Manual total pré-plantio	2
Reforma	Combate formiga sistemático	3
Reforma	Alinhar/marcar (encosta)	4
Reforma	Subsolagem/adubação	5
1ª Manutenção	Adubação manual Cobertura - 2ª Dose	20
1ª Manutenção	Capina quím man total pós-plantio - II	21

Tabela 2 - Situação operacional dos talhões selecionados e área totais dos talhões

Talhões	Área (ha)	Atividade inicial
1	14,00	Adubação manual Cobertura - 2ª Dose
2	13,80	Adubação manual Cobertura - 2ª Dose
3	25,00	Combate Formiga em Reserva/Defesa - I
4	20,00	Capina quím. manual total pré-plantio
5	51,00	Combate formiga sistemático
6	37,00	Alinhar/marcar (encosta)

Os talhões 1 e 2 estão em fase de 1ª manutenção do plantio e ambos iniciam suas atividades neste projeto pela Adubação manual de cobertura – 2ª dose. Seguindo a sequência das atividades, a próxima atividade realizada é a capina química manual total pós-plantio – II. A implementação do modelo considerou a finalização de uma atividade como ponto de referência para a próxima iniciar.

O modelo foi resolvido pelo método *Branch-And-Bound* (IGNALL and SCHRAGE, 1965) e os pressupostos do problema foram:

- Todos os trabalhadores estão aptos a realizar quaisquer atividades e possuem rendimentos distintos entre si;
- Cada trabalhador deve executar apenas uma atividade dentro da semana z;
- Cada talhão recebe apenas uma atividade durante a semana z;
- Todos os talhões referentes à mesma fase de plantio possuem a mesma sequência de atividades a serem realizadas, mas iniciam em atividades distintas;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelo

O modelo desenvolvido tem como objetivo minimizar a soma das horas por hectare (h/ha)trabalhadas, por meio da seguinte função objetivo e restrições:

$$\text{F.O} = \min \sum_{i=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^o \sum_{t=1}^p r_{iyzt} X_{iyzt} \quad (1)$$

Restrição por trabalhador

$$\sum_{i=1}^m \sum_{z=1}^o X_{iyzt} \geq 1, \quad \forall y, t \quad (2)$$

Restrição por atividade

$$\sum_{y=1}^n \sum_{t=1}^p X_{iyzt} = 1, \quad \forall i, z \quad (3)$$

Limites de tolerância para as áreas de cada talhão

$$\sum_{i=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^o R_{iy} X_{iyzt} + \overline{R}_{iy} f_t \leq (1+\alpha)A_t, \quad \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^o R_{iy} X_{iyzt} + \overline{R}_{iy} f_t \geq (1-\alpha)A_t, \quad \forall t \quad (5)$$

A alocação semanal de todos trabalhadores é feita de acordo com os rendimentos individuais e a restrição 2 garante que todos os trabalhadores realizem uma atividade y, no talhão t, na semana z. A mão-de-obra foi considerada um recurso renovável, a cada período iniciado (semana), a quantidade de recurso era renovada.

A restrição relacionada à atividade (3), admite que a soma de todas as alternativas de trabalhador i e semana z , para cada atividade y do talhão t , seja maior ou igual a um, ou seja, cada atividade da lista do talhão t , deve ser executada.

As restrições (4 e 5) referem-se às quantidades de área realizada da atividade y no talhão t . A restrição 4 representa o limite superior, para que o modelo reconheça o momento de finalizar a execução da atividade y no talhão t e, a restrição 5 refere-se ao limite inferior, limitando o mínimo que deve ser realizado da atividade y no talhão t .

Alfa é o limite de tolerância de 10%, para mais ou para menos, considerado para realização de área da atividade y , talhão t e f é a folga para cada combinação atividade-talhão.

Restrição de sequenciamento

$$\sum_{y=1}^n \sum_{t=1}^p X_{i(y+1)zt} + \sum_{y=1}^n \sum_{t=1}^p X_{iyz(t+1)} = 0 \quad (6)$$

Restrição binária

$$X_{iyzt} \in \{0,1\}, \quad \forall i, y, z, t \quad (7)$$

A restrição de sequenciamento (6) permite que a atividade subsequente seja realizada após sua antecessora finalizar.

Por fim, uma restrição binária (7) foi introduzida para que as características do problema formulado fossem atendidas.

Em que:

R_{iyzt} - Rendimento em horas por hectare do trabalhador i , atividade y , semana z e talhão t ;

R_{iy} - Rendimento em hectares por semana do trabalhador i na atividade y ;

X_{iyzt} - Variável binária (0 ou 1) de decisão, referente ao trabalhador i , atividade y , semana z , talhão t ;

m - Número total de trabalhadores;

n - Número total de atividades;

o - Número total de semanas;

p - Número total de talhões.

A restrição binária define que, as variáveis decisórias do modelo terão valores zero ou um, funciona como um processo de desligamento da alternativa (zero) ou seleção da alternativa (um).

Tabela 3- Representação da chave atividade_talhão, rendimento médio (h/ha) de cada atividade

Chave	Rendimento médio (h/ha)
Adubação manual Cobertura - 2ª Dose_00663_039	11.3
Capina quím man total pós-plantio - II_00663_039	9.6
Adubação manual Cobertura - 2ª Dose_00665_001	11.3
Capina quím man total pós-plantio - II_00665_001	9.6
Capina quím mec total pré-plantio_00682_002	6.6
Combate formiga sistemático_00682_002	3.0
Combate formiga sistemático_00681_005	3.0
Alinhar/marcar (encosta)_00681_005	8.5
Alinhar/marcar (encosta)_00681_006	8.5
Subsolagem/adubação_00681_006	2.8

Tabela 4 – Agendamento das atividades por trabalhadores nos talhões, durante as quatro semanas planejadas

Talhão	Atividade trabalhador				Área total	Área executada			
	1	2	3	4		1	2	3	4
00663_039	X20_1				14	3.54			
00663_039					14				
00663_039				X21_3	14			4.32	
00663_039					14				
00663_039					14				
00663_039					14				
00663_039					14				

00663_039				14			
00663_039				14			
00663_039				14			
00665_001				13.8			
00665_001	X21_2	X20_2		13.8	4.22	3.56	
00665_001				13.8			
00665_001				13.8			
00665_001				13.8			
00665_001				13.8			
00665_001				13.8			
00665_001				13.8			
00665_001				13.8			
00665_001				13.8			
00681_005		X03_1		51		12.12	
00681_005				51			
00681_005		X03_3		51		18.18	
00681_005			X04_4	51			4.71
00681_005				51			
00681_005	X04_6	X03_6	X04_6	51	4.82	12.90	4.82
00681_005			X04_7	51			4.90
00681_005	X04_8	X03_8	X04_8	51	4.98	12.90	4.98
00681_005	X04_9		X04_9	51	5.06		5.06
00681_005	X04_10		X04_10	51	5.14		5.14
00681_006	X05_1			37	13.33		
00681_006			X05_1	37			13.33
00681_006				37			
00681_006	X04_4			37	4.71		
00681_006		X05_5		37		13.79	
00681_006	X04_6			37	4.82		
00681_006	X04_7			37	4.90		
00681_006	X04_8			37	4.98		
00681_006	X04_9		X04_9	37	5.06		5.06
00681_006	X04_10		X04_10	37	5.14		5.14
00682_001				25			
00682_001			X02_2	25			6.79
00682_001	X01_3			25	8.89		
00682_001		X02_4	X01_4	25		6.12	8.70
00682_001			X02_5	25			7.49
00682_001				25			
00682_001		X02_7	X01_7	25		6.94	9.59
00682_001				25			
00682_001				25			
00682_001				25			
00682_002				20			
00682_002	X02_2			20	6.79		
00682_002		X03_3		20		18.18	

00682_002			20		
00682_002	X02_5	X02_5	20	7.49	7.49
00682_002			20		
00682_002			20		
00682_002			20		
00682_002			20		
00682_002			20		

Tabela 5 – Cronograma de trabalho gerado pela PI, apresentando as semanas selecionadas a partir das restrições e objetivo do modelo

Chave	Semana			
	1	2	3	4
Adubação manual Cobertura - 2ª Dose_00663_039				
Capina quím man total pós-plantio - II_00663_039				
Adubação manual Cobertura - 2ª Dose_00665_001				
Capina quím man total pós-plantio - II_00665_001				
Combate Formiga em Reserva/Defesa - I_00682_001				
Capina quím mec total pré-plantio_00682_001				
Capina quím mec total pré-plantio_00682_002				
Combate formiga sistemático_00682_002				
Combate formiga sistemático_00681_005				
Alinhar/marcar (encosta)_00681_005				
Alinhar/marcar (encosta)_00681_006				
Subsolagem/adubação_00681_006				

O modelo permite que uma atividade inicie em um talhão, antes mesmo que sua antecessora seja finalizada, este é um ponto de atenção do modelo, pois não é praticável e nem viável operacionalmente que duas atividades ocorram simultaneamente em um mesmo talhão ou que uma atividade inicie sem que a anterior seja finalizada. As atividades não foram sobrepostas na solução encontrada pelo modelo, o modelo designou uma atividade por talhão t e semana z. Operacionalmente, atividades não devem se sobrepor, este é um ponto positivo do modelo.

A programação das atividades ocorreu de forma que todos os 10 trabalhadores foram designados para atividades durante todas as semanas.

A programação das atividades respeitando a sequência em que elas devem ocorrer, e designando trabalhadores com o melhor rendimento para cada atividade, permite a otimização da alocação da mão-de-obra, visando a redução do tempo do projeto. A programação das atividades otimizando a alocação da mão-de-obra, permite também a organização do trabalho à medida que, a área dos talhões em que uma atividade não foi realizada, é contabilizada para o próximo planejamento.

As atividades, na prática, possuem um intervalo de realização entre elas, desconsiderado nesta implementação devido ao horizonte de planejamento ter um curto prazo de quatro semanas. Em problemas com horizontes maiores, a implementação do intervalo entre as atividades deve ser considerada dentro do tempo em semanas entre uma atividade e sua sucessora.

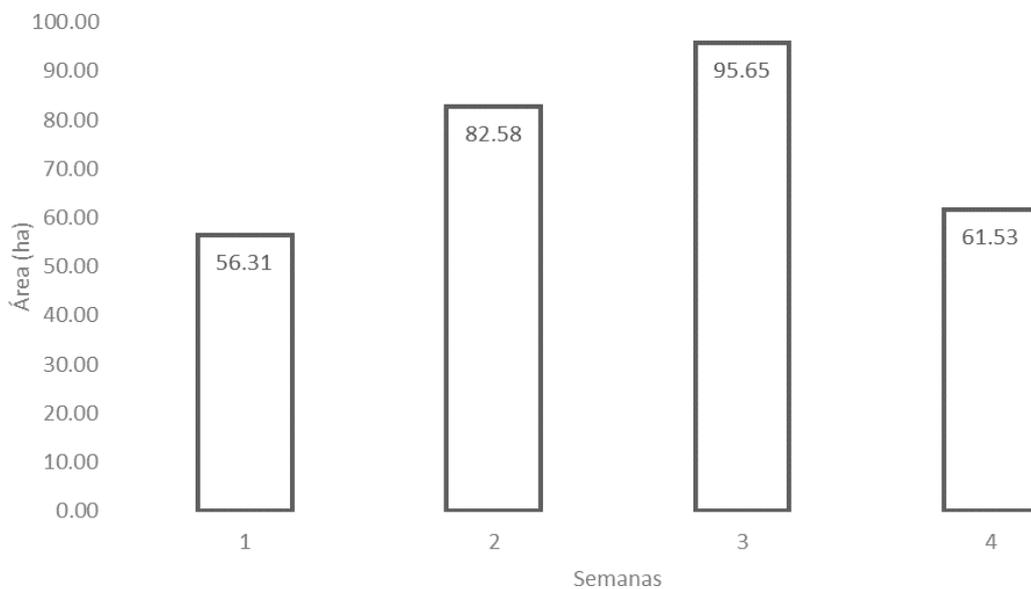


Figura 1– Áreas totais em que as atividades foram executadas durante as quatro semanas.

A quantidade de área varia durante as semanas, atividades distintas realizadas na mesma quantidade de área, apresentam tempo de execução distintos, devido ao fato de que cada atividade possui um rendimento médio específico (TABELA 3), contribuindo para um maior ou menor tempo de permanência na área durante a semana, para realizar a mesma quantidade de área.

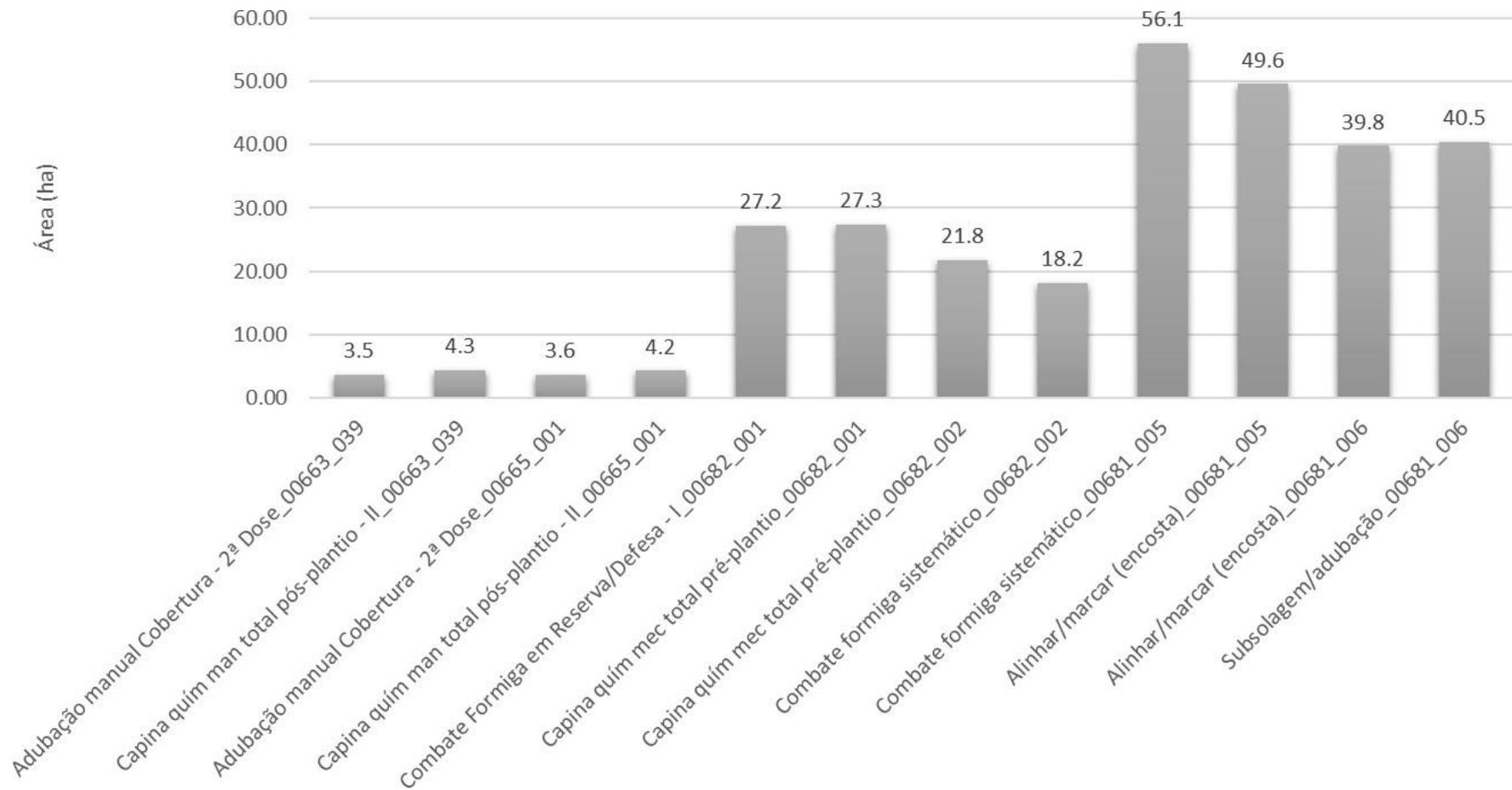


Figura 2 - Área realizada por atividade e talhão.

As áreas das chaves Atividade–Talhão (FIGURA 2) são áreas com valores próximos a da área total dos talhões, apresentando uma variação de 10% flexibilizada pelo modelo, por ser um modelo de PI de designação e possuir valores que, por designação, não fechariam exatamente as áreas reais dos talhões. A soma dos rendimentos em área dos trabalhadores não atinge exatamente a totalidade da área de cada talhão, por isso a restrição com limites flexibilizando a área foi importante para limitar essa variação no momento da designação dos trabalhadores. A restrição 5, referente ao limite mínimo em área da atividade y no talhão t, não foi atendida para os talhões 1 e 2 (TABELA 6). Estes tiveram apenas um trabalhador designado durante uma das semanas. Os demais talhões tiveram a restrição 5 respeitada de acordo com os limites impostos.

Áreas que não ficaram dentro dos limites, foram consideradas como folga para serem programadas para as próximas semanas.

Tabela 6 – Rendimentos médios, área executada da chave atividade_talhão e a variação em porcentagem de área.

Chave	Rendimento médio (h/ha)	Área talhão (ha)	Área executada (ha)	Variação
Adubação manual Cobertura - 2 ^a Dose_00663_039	11.3	14.0	3.5	74.69%
Capina quím man total pós-plantio - II_00663_039	9.6	14.0	4.3	69.11%
Adubação manual Cobertura - 2 ^a Dose_00665_001	11.3	13.8	3.6	74.21%
Capina quím man total pós-plantio - II_00665_001	9.6	13.8	4.2	69.42%
Combate Formiga em Reserva/Defesa - I_00682_001	4.5	25.0	27.2	-8.71%
Capina quím mec total pré- plantio_00682_001	0.6	25.0	27.3	-9.37%
Capina quím mec total pré- plantio_00682_002	0.6	20.0	21.8	-8.86%
Combate formiga sistemático_00682_002	3.0	20.0	18.2	9.09%
Combate formiga sistemático_00681_005	3.0	51.0	56.1	-10.02%
Alinhar/marcar (encosta)_00681_005	8.5	51.0	49.6	2.77%
Alinhar/marcar (encosta)_00681_006	8.5	37.0	39.8	-7.55%
Subsolagem/adubação_00681_006	2.8	37.0	40.5	-9.35%

O modelo apresenta algumas limitações de sequenciamento das atividades já citadas. Ele entende que uma vez iniciada uma atividade dentro de um talhão, sua sucessora pode ser iniciada. Operacionalmente isto pode não ser praticável, devido à organização do trabalho em camponão permitir a

sobreposição de atividades, a não ser aquelas que podem ser realizadas simultaneamente, o que não é o caso das atividades planejadas neste estudo. Quando os trabalhadores entram na área para realizar uma atividade, ela deve ser finalizada para que a atividade sucessora seja iniciada.

Estas limitações são oportunidades de melhoria para que o modelo fique mais completo e se enquadre nas particularidades de cada situação, dentro do contexto operacional das empresas florestais.

CONCLUSÃO

O modelo proposto neste estudo permite agendar as atividades nos talhões correspondentes às fases de plantio em que as atividades são listadas e, define qual trabalhador irá realizar a atividade com base no seu rendimento, visando a minimização das horas por hectare do projeto.

Existem algumas lacunas não preenchidas pelo modelo, como a garantia de que uma atividade seja finalizada no talhão para que outra seja iniciada.

A regulação da mão-de-obra foi atendida, e o modelo deixa oportunidades de desenvolvimento de restrições de diversas naturezas, a fim de atender às demandas organizacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIR, L. S.; ALIG, R. J. **Regional cost information for private timberland conversion and management**. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2007.

BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J. P.; GREBNER, D. L. **Forest management and planning**. 2nd ed. Academic press, 2017.

IGNALL, E.; SCHRAGE, L. Application of the branch and bound technique to some flow-shop scheduling problems. **Operations research**, v. 13, n. 3, p. 400-412, 1965.

JOHNSTON, D. R.; GRAYSON, A. J.; BRADLEY, R. T. **Planeamento florestal**. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian, 1977, 798 p.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel**. Elsevier, 2004.

MENDONÇA, N de P. Aplicação do método simulated annealing em um problema de sequenciamento das atividades silviculturais. Lavras, MG: UFLA, 2016. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, 2016.

MOAK, J. E. Forest practices cost trends in the South. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 6, n. 3, p. 130-132, 1982.

STRAKA, T. J.; DUBOIS, M. R.; WATSON, W. F. Costs and cost component trends of hand and machine tree planting in the southern United States (1952 to 1990). **Tree Planters' Notes**, v. 43, n. 3, p. 89-92, 1992.

WATSON, W. F.; STRAKA, T. J.; BULLARD, S. H. Costs and cost trends for forestry practices in the South. **Faculty Publications**. 1987.

YAMASHITA, D. S.; MORABITO, R. Um algoritmo exato para o problema de programação de projetos com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 27-49, 2007.