

Alocação de pátio de estocagem com diferentes distâncias de arraste de tora em área de concessão florestal na Amazônia

Arien Hiusaki de Moura Santos^{1*}, Evandro Ferreira da Silva², Giovanni Correia Vieira³, Jeangelis Silva Santos⁴, Fernanda Santos Ferreira⁵, Sayara Beatriz dos Santos Silva⁵

¹Mestrando em Biodiversidade e Conservação da Universidade Federal do Pará, Altamira, Brasil.

²Docente da Universidade Federal do Pará, Altamira, Brasil. ³Docente do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Rondônia, Rondônia, Brasil. ⁴Técnico Agropecuário do Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo, Espírito Santo, Brasil. ⁵Discente de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Pará, Altamira, Brasil. *moura.arien.hiu@gmail.com

Recebido em: 22/07/2023

Aceito em: 17/05/2024

Publicado em: 31/07/2024

DOI: <https://doi.org/10.29327/269504.6.1-8>

RESUMO

A alocação de pátios de estocagem é parte importante da infraestrutura por se relacionar com a abertura de estradas florestais e trilhas de arraste. A pesquisa teve como objetivo propor um modelo de otimização para alocação de pátios de estocagem com restrições de volume e classes de distâncias de arraste de toras. A área de estudo está localizada na Floresta Estadual do Paru, Monte Alegre-PA, Unidade de Manejo Florestal IX, Unidade Produção Anual 03, Unidade de Trabalho 7 e 8, com área de 168,67 ha, 459 árvores, e volume estimado de 3.994,4 m³. O modelo matemático tem o objetivo de reduzir a distância de ligação entre as árvores e os pátios com restrições de volume máximo de madeira e duas distâncias. Foram processados 27 cenários no CPLEX Studio 20.1.0. Os 4 melhores cenários foram comparados ao planejamento executado pela empresa, e escolhido o melhor cenário pelo método AHP. Foi possível observar a redução média de 18% no custo total da infraestrutura de exploração e distribuição do volume mais uniforme nos pátios dos cenários otimizados. O cenário 2 apresentou melhor desempenho. Por fim, a aplicação do modelo de otimização em florestas naturais é viável e permite otimizar o tempo de processamento e o planejamento das infraestruturas.

Palavras-chave: Pesquisa operacional. Manejo florestal de precisão. Exploração de impacto reduzido.

Storage yard allocation with different skid trails distances in Amazon Forest concession area

ABSTRACT

The allocation of storage yards is an important part of the infrastructure as it relates to the opening of forest roads and skid trails. This research aimed to propose an optimization model for the allocation of storage yards with volume restrictions and classes of skid trail distances. The study area is located in the Paru State Forest, Monte Alegre-PA, Forest Management Unit IX, Annual Production Unit 03, Work Unit 7 and 8, 168.67 ha area, 459 trees and 3,994.4 m³ estimated wood volume. The mathematical model aims to reduce the connection distance between trees and storage yards by restrictions maximum volume of wood and two skid trails distances. Were processed 27 scenarios in CPLEX Studio 20.1.0. Four best scenarios were compared to the planning executed out by the company, and the best scenario was chosen using the AHP method. The optimized scenarios reduced 18% in the total exploitation infrastructure cost average and there was greater homogeneity in the storage yards volume distribution. Scenario 2 performed better. Lastly, the application of the optimization model in natural forests is feasible and allows optimizing processing time and infrastructure planning.

Keywords: Operational research. Precision forest management. Reduced impact logging.

INTRODUÇÃO

O Brasil possui 309,4 milhões de hectares de florestas públicas, das quais aproximadamente 92% estão localizadas no bioma Amazônia (SFB, 2022). Em 2006 foram criados modelos de gestão de florestas públicas para a produção sustentável, através da Lei nº 11.284, possibilitando a destinação de florestas públicas à iniciativa privada com o objetivo de produção, mediante o mecanismo de concessão florestal (BRASIL, 2006). Áreas de concessão florestal são florestas públicas outorgadas à iniciativa privada para utilização dos recursos florestais, com retorno financeiro ao governo brasileiro por meio do pagamento de um valor preestabelecido por m³ de madeira em tora explorada, sob os princípios do Manejo Florestal Sustentável (MFS) e Exploração de Impacto Reduzido (EIR) (SILVA, 2019).

O MFS é a administração dos recursos florestais sob princípios da conservação, de forma que resultem em benefícios sociais, ambientais e econômicos, promovendo a sustentabilidade das florestas (GAMA et al., 2005). O Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) é uma alternativa de continuidade da produção e aumento de produtividade nas atividades de exploração (SILVA et al., 2014).

A exploração sustentável de madeira é baseada em técnicas que visam o planejamento minucioso e controlado, conduzido por profissionais devidamente qualificados para reduzir os impactos negativos da exploração, também conhecido como Exploração de Impacto Reduzido (EIR) (PUTZ et al., 2008). A aplicação de EIR reduz muitos efeitos negativos, entretanto, a ferramenta aplicada de forma isolada não é suficiente para garantir a produtividade do empreendimento. Em florestas tropicais há diferenças no porte das árvores e de relevo que refletem no uso dos maquinários (FAO, 1974) e requer planejamentos que captem as variadas condições existentes em florestas nativas.

As florestas nativas do bioma amazônicos são ambientes diversificados e de distribuição irregular das espécies, ou seja, dificilmente a divisão de uma unidade de manejo em áreas iguais irá resultar em distribuição igual do volume (BRAZ et al., 2014), diante disso, o manejo dos recursos florestais se torna um desafio complexo (SILVA et al., 2020). Nesse sentido, surge o manejo florestal de precisão que utiliza técnicas e ferramentas que melhoram os processos de tomada de decisão, como o Modeflora, (FIGUEIREDO et al., 2007). No entanto, algumas decisões dos gestores florestais são baseadas nos conhecimentos empíricos e que poderiam ser otimizadas, como por

exemplo, o planejamento da alocação de pátios de estocagem, estradas florestais e trilhas de arraste (SILVA, 2015).

A otimização das atividades é um processo de escolha das melhores ações e decisões para resolver um determinado problema (KAYA et al., 2016). Dessa forma, o uso de Sistemas de Informação Geográficas (SIG), para entender as variações geográficas do terreno, (BASKENT; KELES, 2005), e de técnicas de Pesquisa Operacional (PO), tem sido utilizada de forma conjunta no planejamento para auxiliar no processo de tomada de decisão pelos gestores dos empreendimentos florestais. Apesar de serem mais aplicados ao contexto de florestas plantadas, a partir dos anos 2000 é observado o aumento de pesquisas relacionadas ao planejamento otimizado em florestas nativas, principalmente na Amazônia (MATOS et al., 2021).

Combinação de SIG e modelos de otimização tem sido amplamente aplicado em planos de manejo Florestal em diversos lugares do mundo, para otimizar as atividades de exploração. Hosaka et al., (2022) utilizaram Programação Linear Inteira para otimizar um plano de manejo de fragmentos florestais e a conexão desses povoamentos com as redes rodoviárias para facilitar o processo de desbaste ao longo do tempo, Silva et al. (2020) avaliaram a eficiência do planejamento otimizado dos pátios de estocagem através do uso de SIG e programação matemática, em comparação com o planejamento tradicional, Fernandes et al., (2013) utilizaram PO para identificar o caminho crítico e os fatores limitantes na velocidade das atividades do manejo florestal e Martinhago (2012) utilizou métodos de otimização em conjunto com SIG para auxiliar a alocação de pátios de estocagem para exploração em florestas amazônicas.

Os estudos realizados na Amazônia utilizaram modelos de otimização para encontrar locais ótimos de alocação dos pátios de estocagem baseadas na localização e desconsideraram as características das árvores que poderiam ser adicionados aos modelos, como por exemplo, o volume das árvores. A alocação dos pátios em locais mais próximos das árvores de maior volume pode promover menor esforço dos tratores florestais e reduzem os impactos na vegetação remanescente e no solo.

O planejamento das atividades do MFS combinadas com ferramentas de otimização auxilia na alocação de infraestruturas florestais, melhoram os processos, reduzem custos e impactos negativos ocasionados pelas atividades de extração. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é propor um modelo de programação matemática para alocação

de pátios de estocagem de madeira com restrições de volume e classes de distâncias de arraste de toras.

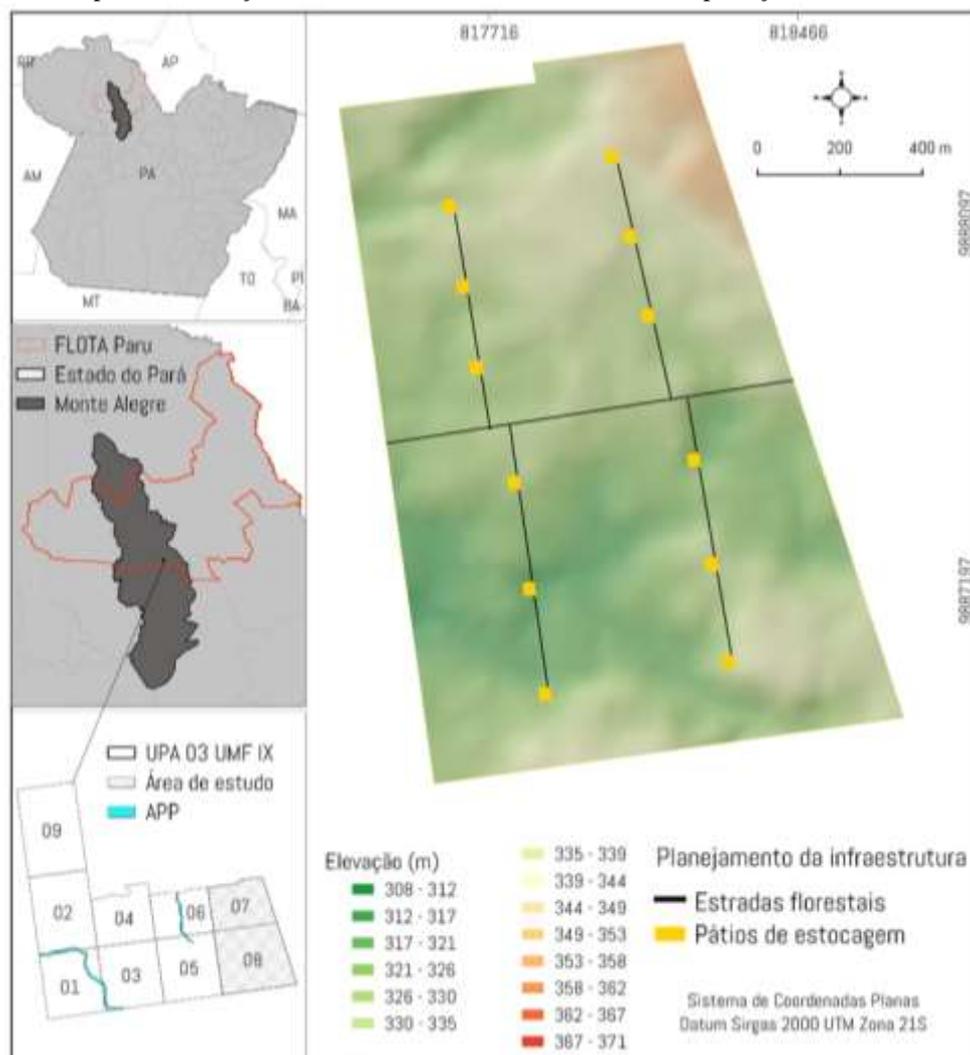
MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo está localizada na Floresta Estadual do Paru, Pará (Decreto nº 2.608 de 04 de dezembro de 2006, Governo do Estado do Pará), calha norte do Rio Amazonas, com extensão territorial de 3.612.914 hectares, inserida no município de Monte Alegre, sob as coordenadas Latitude 02° 00' 28" S e Longitude 54° 04' 09" O. A Unidade de Produção Anual 03 (UPA 03) está inserida na Unidade de Manejo Florestal (UMF) IX. A UPA 03 possui 794,25 ha de área de efetivo manejo e 6 ha de Área de Preservação Permanente (APP), sendo dividida em 09 Unidades de Trabalho (UT) com tamanho médio de 80 ha cada. Para aplicação do modelo de otimização proposto foram selecionadas as UTs 07 e 08, com área total de 168,67 ha (Figura 1).

A cobertura vegetal da Flota do Paru é caracterizada pela presença predominante de florestas ombrófila densa submontana (74,83%), florestas ombrófila densa de terras baixas (1,97%) e floresta de transição (13,45%) que é caracterizada pela transição do cerrado com a floresta densa submontana (PARÁ, 2010). De acordo com a classificação de Köppen, o clima é do tipo Am, com temperatura média anual de 26° C e pluviometria média anual de 2.500 mm (ALVARES et al., 2014).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo e infraestrutura de exploração.



Banco de dados

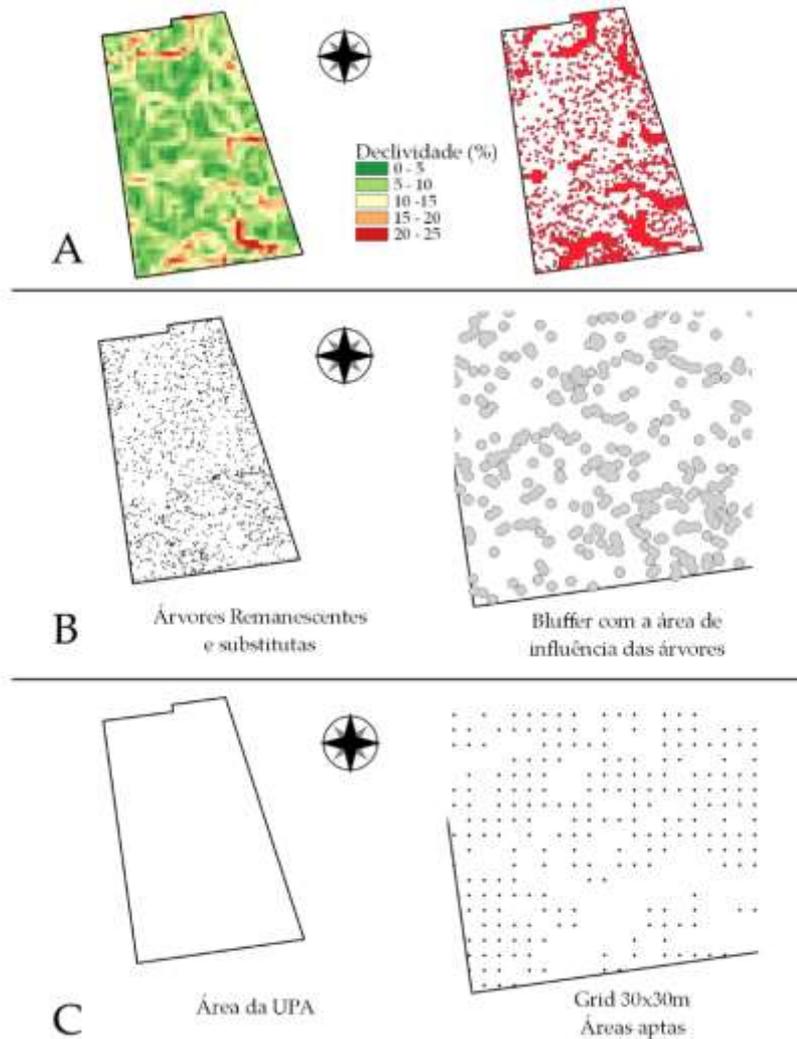
O banco de dados utilizado no processamento foi cedido pela empresa concessionária RRX Agroflorestal. Foi realizado o inventário censitário e coletado as informações da altura comercial (H), circunferência a 1,30 m do solo ($C_{1,30}$), identificação botânica e coordenadas geográficas, e tabuladas em uma planilha eletrônica. Após o inventário, as informações foram processadas e obtidas as árvores selecionadas para corte. As UTs 7 e 8 (165,67 ha) possuem 459 árvores exploráveis com volume total estimado de 3.994,4 m³ de madeira, distribuídas em 16 espécies.

Definição das áreas aptas para alocação de pátios de estocagem

O processo de definição de locais aptos para a instalação dos pátios de estocagem foi baseado na metodologia proposta por e Martinhago (2012) e Silva (2015) que

compreende a exclusão de áreas com relevo maior que 10% (Figura 2A), exclusão da área de influência das árvores remanescentes e substitutas (Figura 2B) e inserção de uma malha de pontos de 30 m equidistantes nas áreas aptas (Figura 2C). Como não houve a presença de APP na área de estudo, não houve necessidade de processamento dessa variável.

Figura 2 – Metodologia de alocação de possíveis pátios de estocagem de madeira.



O relevo da UPA influencia no planejamento das estradas florestais e trilhas de arraste. Dessa forma, a modelagem do terreno foi realizada a partir da imagem de radar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), seguindo os critérios de classificação do relevo de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA (1979). Para este estudo, as áreas selecionadas como aptas possuem até 10% de declividade, definidas como relevo ondulado suave.

Foi adicionado um buffer de 20 m para excluir a área de influência das árvores remanescentes e substitutas afim de evitar danos na vegetação e a alocação de pátios estocagem em locais onde há presença de árvores de grande porte.

Por fim, foi criada uma malha de pontos regulares de 30 x 30 m nas áreas aptas, foram excluídos os pontos em áreas inaptas, resultando em 1.274 possíveis locais para alocação de pátios de estocagem. A espacialização e planejamento dos resultados foi realizado no Software QGIS, versão 3.22.4.9.

Organização dos dados

Após a definição dos locais de possíveis pátios de estocagem (1.274 pátios) e de posse da localização e informações pertinentes das árvores exploráveis (459 árvores), as coordenadas das duas variáveis foram exportadas (SIRGAS 2000 UTM Zona 21 M) e calculada a matriz de distância euclidiana de ligação de todas as árvores a todos os pátios no software R Studio Versão 2022.12.0+353. A matriz de distância e o volume de cada árvore serviram como *input* de dados no modelo de otimização.

Modelo matemático

O modelo de p-medianas consiste em formar grupos ao diminuir a distância de ligação de cada ponto de demanda para o ponto de oferta. Nesse sentido, define as instalações que devem ser abertas (pátios de estocagem de madeira) para receber a oferta de volume de madeira (árvores exploráveis), associado às restrições de capacidade máxima da instalação em receber a oferta de madeira (BELFIORE; FÁVERO, 2012; DREZNER; HAMACHER, 2002; HEKMATFAR; PISHVAEE, 2009).

Ao modelo proposto foi adicionado o volume limite de arraste (V) que tem o objetivo de condicionar a distância de ligação da instalação à oferta em função do volume da árvore. Assim, a restrição tem o objetivo de limitar o arraste de árvores de grande porte em distâncias menores durante a exploração florestal. A seguir, é apresentado o modelo de p-medianas com restrição de distância máxima de arraste em função do volume da tora e volume máximo do pátio de estocagem:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^P d_{ij}x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{j=1}^P X_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^P Y_j = p \quad (3)$$

$$X_{ij} - Y_j \leq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i X_{ij} \leq Q_j \quad (5)$$

$$d_{ij} X_{ij} \leq Dmáx_1 \quad \forall Vi \geq V \quad (6)$$

$$d_{ij} X_{ij} \leq Dmáx_2 \quad \forall Vi < V \quad (7)$$

i = árvores; j = pátio; P = número total de pátios possíveis de serem alocados na área; d_{ij} = distância euclidiana da árvore i para o pátio j ; p = quantidade de pátios a serem efetivamente alocados ($p \in P$); X_{ij} = variável binária (0 ou 1) que assume o valor 1 caso a árvore i seja arrastada para o pátio j , e 0 em caso contrário; Y_j = é uma variável binária (0, 1), assume o valor 1 para um pátio selecionado e zero em caso contrário; q_i = volume da árvore i , Q_j = volume máximo do pátio j ; V = volume limite de arraste; Vi = volume da árvore; $Dmáx_1$ = distância máxima permitida da árvore i até o pátio quando o volume da árvore (Vi) for maior que o volume limite de arraste (V); $Dmáx_2$ = distância máxima permitida da árvore i até o pátio j quando o volume da árvore (Vi) for menor que o volume limite de arraste (V).

A função objetivo (FO) (1) minimiza o somatório da distância euclidiana entre cada árvore e o pátio. A primeira restrição (2) garante que cada árvore não pode ser ligada a mais de um pátio. A segunda restrição (3) garante que de todos os pátios possíveis (P) de serem selecionados, apenas a quantidade pré-determinada de pátios será selecionada (p). A terceira restrição (4), relacionada com a segunda restrição (3), permite decidir quais serão os pátios (p) selecionadas dentro do universo de todos os pátios possíveis (P). A quarta restrição (5) garante que a capacidade máxima de volume do pátio (Q_j) não seja ultrapassada. As árvores com maior volume promovem maior esforço do trator florestal e maior risco de compactação do solo durante a atividade de extração, ou seja, é interessante limitar o arraste de toras mais pesadas em distâncias menores, para esse fim a quinta restrição (6) garante que a distância máxima de arraste da árvore i ao pátio j seja $Dmáx_1$ quando o volume da árvore (Vi) for maior que o volume limite de arraste (V), se o volume da árvore (Vi) for menor que o volume limite de arraste (V) a sexta restrição (7) garante que a distância máxima de ligação da árvore i ao pátio j seja $Dmáx_2$.

Para avaliar o impacto das restrições (6) e (7) na solução do modelo foi obtida a densidade média da madeira pós corte das espécies inventariadas e obtida a densidade úmida média (JAEGER, 2012). Posteriormente, foi realizado o ajuste dos dados das

densidades das árvores por uma regressão linear simples. Em seguida, foram escolhidas as espécies mais representativas do banco de dados (cerca de 75%) e obtida a média da densidade úmida de $1,25 \text{ t m}^{-3}$. O volume limite de arraste (V) está relacionado à carga máxima de transporte, média de 6 t, recomendada pela fabricante de um trator florestal *Skkider 525D*, ou seja, as árvores que possuem volume acima de $4,8 \text{ m}^3$ devem ter prioridade de arraste em menores distâncias.

Para escolher as classes de volume limite de arraste (V) foi realizado uma análise estatística descritiva do volume das árvores. Foi possível observar que a amplitude de volume das árvores do banco de dados variou entre $1,3 \text{ m}^3$ a $45,5 \text{ m}^3$. Nesse sentido, 50% das árvores exploráveis possuem até $7,6 \text{ m}^3$, 65% até $9,6 \text{ m}^3$ e 75% até $10,8 \text{ m}^3$ de volume. Modelar o arraste com distâncias diferentes de acordo com o volume da tora, tem como objetivo evitar o superaquecimento do maquinário, reduzir o consumo de combustível e desgastes, além dos riscos da compactação do solo.

O volume máximo de 350 m^3 de madeira foi estabelecido por pátio de estocagem devido a formação de pilhas estáveis com até 3,5 m de altura, de acordo com as normas de segurança do trabalho.

A quantidade mínima de pátios foi obtida na equação (8) através do volume total estimado e o volume máximo por pátio de estocagem. Quando as restrições não foram atendidas em conjunto, dentro do tempo máximo de processamento, foi adicionado uma unidade em pt no modelo de otimização (3).

$$pt = \frac{Vt}{V_{pt}} \quad (8)$$

pt = quantidade mínima de pátios; Vt = volume estimado total; V_{pt} = capacidade máxima de volume do pátio (350 m^3).

A distância ideal de arraste pode ser obtida, teoricamente, pela separação ótima entre estradas secundárias. Ao considerar a distância ótima entre estradas de 1 km, a área de influência do arraste de toras varia entre 250 m a 500 m, dependendo da situação topográfica do terreno (BRAZ, 2010; FIGUEIREDO et al., 2007; SILVA, 2015). Para formular os cenários foram propostas distâncias combinadas variando de 150 m a 350 m, sendo $D_{máx1} = 150 \text{ m}$, 200 m e 250 m e $D_{máx2} = 250 \text{ m}$, 300 m e 350 m .

Definição dos cenários

Os cenários foram selecionados a partir da combinação das restrições de volume máximo por pátio (350 m^3), distância máxima de arraste associadas ao volume limite de arraste (V) ($D_{\text{máx}1} = 150 \text{ m}$, 200 m e 250 m ; $D_{\text{máx}2} = 250 \text{ m}$, 300 m e 350 m) e o volume limite de arraste ($V = 7,6 \text{ m}^3$, $9,6 \text{ m}^3$ e $10,8 \text{ m}^3$), resultando em 27 cenários. Os mesmos foram processados no Software CPLEX Studio IDE 20.1 (IBM, 2022) com tempo máximo de processamento de 15 minutos para resolução do problema.

Posteriormente, foi calculado o parâmetro $FOMin$, que teve o objetivo de definir os quatro cenários com menor quantidade de infraestrutura. A variável escolhida foi a quantidade de pátios de estocagem de cada solução somada à quantidade de pátios equivalente ao somatório da distância euclidiana de ligação de cada árvore a cada pátio da respectiva solução. Para obter a quantidade de trilha de arraste equivalente a um pátio de estocagem, foi considerado o custo de abertura de um pátio em R\$ 313,52 e um metro de trilha de arraste em R\$ 0,092 (SILVA, 2019). Logo, 3.404,13 m de trilhas de arraste é equivalente ao custo de abertura de um pátio de estocagem. Assim, converteu-se o total das distâncias de ligação das árvores de cada cenário em quantidade de pátio que foi somado a quantidade de pátio já definida pelo modelo. Por fim, escolheu-se os quatro cenários com menor valor de $FOMin$, ou seja, menor quantidade de pátios de estocagem.

Os cenários definidos para o planejamento de exploração são apresentados abaixo:

Cenário 1: modelo com restrição de volume máximo (350 m^3) e distância máxima, em que $D_{\text{máx}1} = 250 \text{ m}$ e $D_{\text{máx}2} = 350 \text{ m}$, e $V = 7,6 \text{ m}^3$;

Cenário 2: modelo com restrição de volume máximo (350 m^3) e distância máxima, sendo $D_{\text{máx}1} = 250 \text{ m}$ e $D_{\text{máx}2} = 350 \text{ m}$, e $V = 9,6 \text{ m}^3$;

Cenário 3: modelo com restrição de volume máximo (350 m^3) e distância máxima, sendo $D_{\text{máx}1} = 250 \text{ m}$ e $D_{\text{máx}2} = 350 \text{ m}$, $V = 10,8 \text{ m}^3$;

Cenário 4: modelo com restrição de volume máximo (350 m^3) e distância máxima, sendo $D_{\text{máx}1} = 200 \text{ m}$ e $D_{\text{máx}2} = 350 \text{ m}$, $V = 10,8 \text{ m}^3$;

Cenário 5: planejamento executado em campo.

Na sequência, para comparar os quatro cenários escolhidos com o planejamento executado pela empresa, foi realizado o planejamento de estradas e trilhas de arraste conforme a metodologia do Modeflora, considerando as cotas de elevação, normas e técnicas da Exploração de Impacto Reduzido para evitar a alocação de infraestruturas em locais com má drenagem de água (FIGUEIREDO et al., 2007).

A empresa concessionária adota o planejamento sistemático para definir a localização de pátios de estocagem e estradas florestais, dessa forma, foi necessário planejar as trilhas de arraste para o Cenário 5, e foi realizado o planejamento de pátios de estocagem, estradas florestais e trilhas de arraste nos cenários otimizados.

Avaliação dos cenários

Os cinco cenários tiveram seus resultados comparados pela média e coeficiente de variação da distribuição de volume nos pátios de estocagem, porcentagem de árvores arrastadas dentro das classes de distância de $D_{máx1}$, a estimativa da quantidade e dos custos das infraestruturas florestais, e a razão volume/distância.

Em relação a área impactada os valores estimados referem-se ao dano causado pela remoção da cobertura vegetal onde serão alocadas as infraestruturas de exploração. Sendo a dimensão do pátio de 20 x 25 m, estrada principal com largura de 8 m, estrada secundária com 6 m e trilhas de arraste com 3 m.

Os custos das infraestruturas foram baseados na pesquisa realizada por Silva (2019), com custos de estrada principal de R\$ 2.169,80 por km, estrada secundária de R\$ 1.100,19 por km, trilhas de arraste de R\$ 0,0921 por metro e o pátio de estocagem de R\$ 271,65 por unidade. O coeficiente da atividade de arraste foi obtido através do custo de abertura da trilha de arraste, a média do volume das árvores e a distância média de arraste dos cenários analisados, resultando em um coeficiente de R\$ 1,69 m⁻³ m⁻¹.

Analytic Hierarchy Processos (AHP)

Para definir o melhor cenário foi empregado o método Analytic Hierarchy Process (AHP), para orientar a tomada de decisão de forma técnica. O AHP é um método de análise multicritério proposto por Saaty (1980) que permite comparar variáveis em uma matriz de comparação pareada atribuindo-lhes critérios de importância que variam de 1 a 9, em que 1 representa “menor importância que” e 9 indica “maior importância que”.

As variáveis escolhidas foram: custo total da infraestrutura da exploração (CTIE), área impactada (AI), custo do arraste de toras (CAT), coeficiente de variação do volume dos pátios (CVVP) e razão volume/distância de arraste (RVDA), para compor a matriz pareada de comparação (

Tabela 1). A variável RVDA foi obtida por meio da somatória da razão do volume das árvores pela distância de arraste planejada de cada cenário. As árvores com maior

volume são prioritárias para o arraste em menores distâncias, assim, quanto maior o valor da razão maior a eficiência no arraste das toras.

Tabela 1 - Valores dos critérios.

Fatores	CTIE (R\$)	AI (m ²)	CAT (R\$)	CVVP (%)	RVDA (m ³ m ⁻¹)	Pesos AHP*
CTIE (R\$)	1	5	3	3	7	0,478
AI (m ²)	0,20	1	3	2	3	0,131
CAT (R\$)	0,33	0,33	1	2	3	0,222
CVVP (%)	0,33	0,50	0,50	1	3	0,116
RVDA (m ³ m ⁻¹)	0,14	0,33	0,33	0,33	1	0,053

*A razão de consistência – CR = 0,058 < 0,1. CTIE = Custo Total da Infraestrutura da Exploração; AI = Área Impactada; CAT = Custo Arraste de Toras; CVVP = Coeficiente de Variação do Volume; RVDA = Razão Volume/Distância de Arraste.

Normalização das variáveis

Os valores das variáveis analisadas nos cenários pelo método AHP foram normalizadas no intervalo de 0 a 1 em função de estarem em unidades e escalas diferentes. É importante ressaltar que, o maior valor das variáveis de custo total da infraestrutura da exploração, de área impactada, de custo do arraste de toras e do coeficiente de variação do volume dos pátios foram associados ao valor 0, por motivo de se buscar a redução desses valores nos cenários, e o maior valor da razão volume/distância de arraste foi associado a 1, por expressar o arraste de toras de maior volume por menores distâncias.

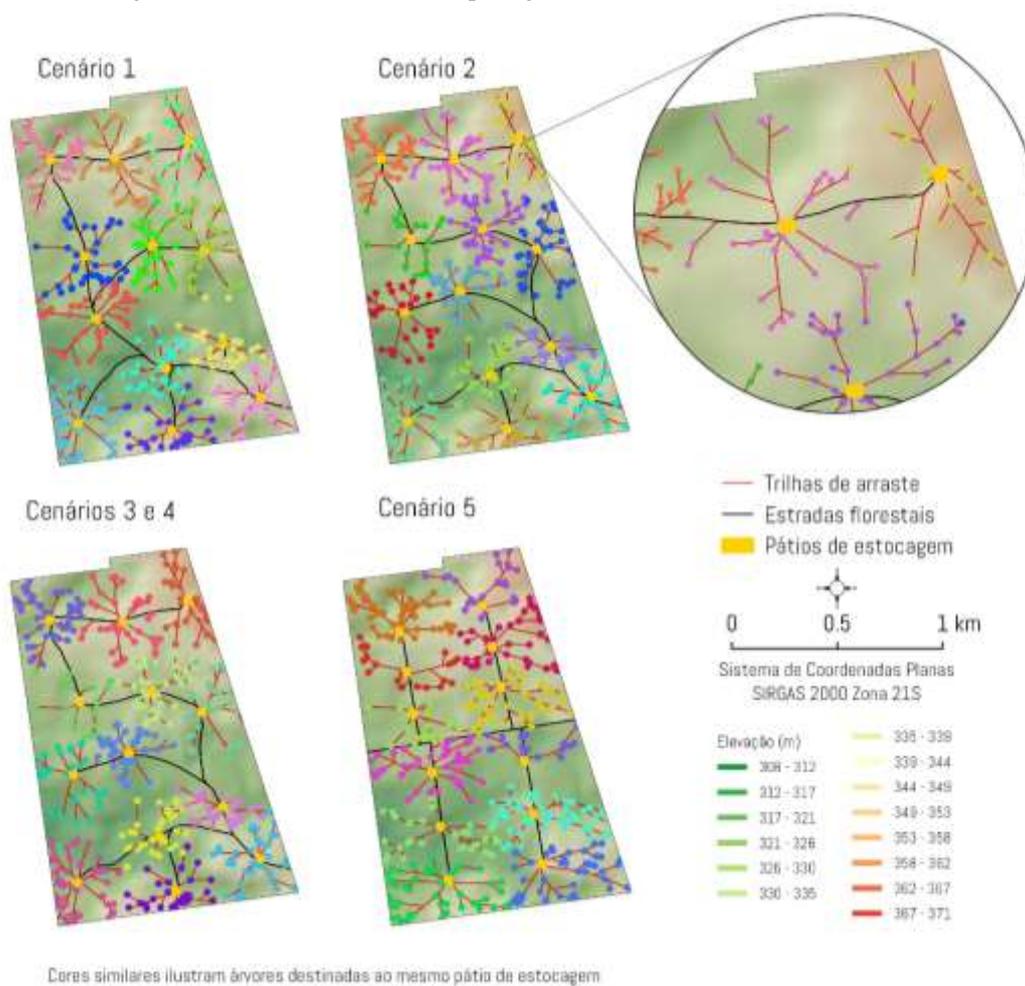
Processamento dos dados

O modelo matemático de programação linear inteira foi construído com auxílio de uma planilha eletrônica da Microsoft Excel 2016 e resolvido através do software de otimização IBM ILOG CPLEX Optimizer Studio versão 20.1, licença Academic Initiative. Os dados foram processados em um notebook com processador Intel Core i5 7th Gen, 8GB, 2.60 GHz, 8GB de memória RAM 512 de HD. A especialização e planejamento dos resultados foi realizado no Software QGIS, versão 3.22.4. 9.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo de otimização busca determinar os locais ótimos para alocação dos pátios de estocagem, para o refinamento do processo foram elaboradas as estradas florestais e trilhas de arrastes (*Item 2.4 Definição dos cenários*). Na Figura 3 é apresentado o planejamento das infraestruturas de exploração para os cenários otimizados.

Figura 3 - Planejamento da infraestrutura de exploração dos cenários analisados.



Distribuição das árvores exploráveis nos cenários

Os cenários 1, 2, 3, 4 e 5 tiveram, respectivamente, 12, 13, 13, 13, 12 pátios de estocagem alocados (Tabela 2). Em função do volume explorável (3.994,4 m³) e da capacidade máxima de estocagem estabelecida (350 m³) a quantidade ideal de pátios seria de 11,41 pátios, que é próximo dos valores observados nos cenários. Contudo, é importante analisar a variação dos volumes em cada pátio, o Cenário 5 teve uma amplitude de 446,6 m³, com quase o dobro do volume máximo de estocagem no Pátio 2 (607,5 m³) e subutilizado no Pátio 3 (160,9 m³).

Há duas situações equivocadas que podem ocorrer quanto à utilização dos pátios:

a) O excesso de volume (>350 m³) reduz a segurança e a eficiência das atividades desenvolvidas no pátio, por falta de espaço para movimentação dos maquinários e maior quantidade de tempo para executar as atividades; b) Pátios acima da capacidade, pátios

quentes, geram custos operacionais logísticos e menor produtividade das frentes de trabalho (SILVA, 2015, 2019).

O MFS na Amazônia ocorre, preferencialmente, em períodos de estiagem (cerca de seis meses), dessa forma, o aumento da ineficiência nas atividades implicam no atraso em todo o planejamento (FERNANDES et al., 2013). Apesar da adoção de algum método de modelagem preditiva da exploração, o planejamento pode sofrer grandes variações em função da heterogeneidade natural das florestas nativas e períodos de estiagem curtos. Dessa forma, é importante identificar e reduzir possíveis lacunas de ineficiência para minimizar os custos e os riscos de acidentes (YOU et al., 2019), como a grande variação dos volumes nos pátios de estocagem. Por exemplo, Santos et al. 2019, utilizaram um modelo de otimização para definir um cronograma eficiente das atividades de colheita e identificou que a produtividade da equipe em terreno declivoso foi reduzida, sendo necessário reorganizar o planejamento de trabalho.

Todos os cenários otimizados apresentaram distribuição mais uniforme do volume nos pátios. No MFS considerando a produtividade média de arraste de $40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e jornada efetiva de 8h, em um dia são arrastados 320 m^3 de madeira (BARRETO et al., 1998; BRAZ, 2010; FIGUEIREDO; LIMA, 2008; HOLMES et al., 2004; SILVA, 2019). A armazenagem de madeira próximo à capacidade do pátio reduz o tempo gasto pelo deslocamento da frente de exploração e a reorganização do início da atividades em outra localidade, pois prejudica o ritmo de trabalho a ocorrência do deslocamento da frente de exploração no meio da jornada de trabalho (Tabela 2).

Tabela 2 - Média e coeficiente de variação dos volumes dos pátios de estocagem de madeira.

	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3 e 4		Cenário 5	
	Vol	n	Vol	n	Vol	n	Vol	n
Média (m^3)	330,37	38,3	307,23	35,31	307,26	35,31	332,87	38,25
CV (%)	6,85	13,46	18,90	21,00	18,09	21,38	35,33	36,53

Vol = volume atribuído ao pátio; n = número de árvores; CV = Coeficiente de variação do volume distribuídos nos pátios.

Distribuição das árvores dentro da restrição de $D_{máx1}$

A alocação otimizada dos cenários 1, 2 e 3, possibilitou em média que 93% do volume explorável estimado seja arrastado dentro da distância $D_{máx1}$ (Tabela 3). Houve pátios de estocagem que receberam 100% do volume dentro da restrição $D_{máx1}$ (Pátio 285 no Cenário 1, Pátios 355 e 575 nos cenários 2 e 3). Quando analisado a estatística descritiva do banco de dados era esperado que até 50% do volume total estivesse dentro

da restrição de distância $D_{máx1}$. No entanto, o modelo de otimização superou essa expectativa ao destinar cerca de 88% do volume total dentro de $D_{máx1}$ (Tabela 3).

Embora os cenários 4 e 5 tenham apresentado semelhanças, o coeficiente de variação do Cenário 4 indica maior uniformidade do volume distribuído dentro da restrição de distância de $D_{máx1}$ em relação ao Cenário 5, refletido por $D_{máx1}$ do Cenário 4 ter a distância mais restritiva dentre os cenários otimizados.

A distância total e $D_{máx1}$ de arraste foram analisadas em cada cenário. Houve redução de 25% na distância total de arraste, com média de 146 m nos cenários otimizados, e redução média de 23% na distância de $D_{máx1}$ nos cenários otimizados (Tabela 3). A redução na média das distâncias de arraste é essencial para promover eficiência no uso do *Skkider*. Lopes et al. (2009) e Miyajima et al. (2020), testaram diferentes distâncias e produtividades na colheita de Eucalipto para avaliar a eficiência do trator florestal *Skkider* e obtiveram melhores rendimentos operacionais em distâncias menores que 200 m associadas com maiores produtividades por unidade de área.

Reduzir a distância de arraste relacionado a abertura de estradas e alocação de pátios de estocagem na floresta nativa é um dos grandes desafios do planejamento quanto a necessidade de ponderar a abertura ideal de cada infraestrutura que reduza o impacto e os custos da exploração.

Tabela 3 - Média e coeficiente de variação do número, do volume das árvores, e distância média, dentro da restrição de $D_{máx1}$.

Cenário	n < $D_{máx1}$	%	CV (%)	Vol < $D_{máx1}$	%	CV (%)	d < $D_{máx1}$	CV (%)
1	36	92,16	15,3	306,46	92,04	10,7	146,11	9,09
2	33	93,78	22,3	287,28	93,27	19,8	138,78	8,61
3	33	95,00	22,3	289,32	94,00	19,8	137,92	8,51
4	28	79,00	24,9	237,98	74,71	26,5	121,37	6,10
5 *	28	74,00	37,1	246,78	74,40	42,6	151,54	9,11

*Restrição de $D_{máx1} = 250$ m distância máxima de arraste adotada pela a empresa. n = número de árvores; d = Média das distâncias de $D_{máx1}$.

Custo total estimado da infraestrutura de exploração

Como mencionado no *Item 2.4 Definição dos Cenários*, a alocação dos pátios foi executada utilizando a distância euclidiana no modelo de otimização. Posteriormente, houve o planejamento das estradas florestais considerando os destaques topográficos e das trilhas de arraste sob as recomendações da técnica “espinha de peixe” para reduzir os danos do arraste de toras na vegetação circundante (BRAZ; OLIVEIRA, 1997). Nesse processo, em casos isolados, ocorreu mudanças de árvores para os pátios de destino e da distância máxima de arraste em função do relevo e do layout da infraestrutura.

Os cenários otimizados tiveram redução de 19%, em média, do custo total de infraestrutura de exploração em relação ao Cenário 5. Não houve variação significativa nos custos da abertura de pátios de estocagem e de trilhas de arraste, pois se manteve o planejamento similar entre os cenários. Houve um acréscimo na quantidade de estradas florestais devido ao layout do planejamento dos cenários otimizados. A atividade de arraste possui grande representatividade, cerca de 82%, do custo total nos cenários. Quando analisadas as infraestruturas, houve a variação de um de pátio de estocagem entre os cenários e aumento do custo de abertura de estradas florestais por motivo de priorizar os destaques topográficos (Tabela 4).

A atividade de arraste é importante ser analisada porque representa cerca de 82% do custo total. A redução líquida média do custo total foi de R\$ 65 mil em uma área de 168,67 ha (16%), dos quais, R\$ 53,3 mil equivale ao custo da atividade de arraste. Considerando uma área de manejo com 1.000 ha, nas mesmas condições da área deste estudo, a redução do custo total de infraestrutura de exploração poderia alcançar R\$ 385,5 mil, em que R\$ 316 mil equivale ao custo da atividade de arraste.

Tabela 4 - Custos estimados das infraestruturas de exploração de cada cenário.

Cenários	n	Pátios		Estradas		Atividade de arraste			Total	Redução
		R\$	km	R\$	km*	km**	R\$	R\$		
1	12	3.259,80	4,35	7.636,33	22,3	143,2	242.581,43	291.171,25	15,64	
2	13	3.531,45	4,69	8.172,37	21,8	134,2	227.418,07	276.060,04	20,02	
3 e 4***	13	3.531,45	4,66	7.983,85	22,5	134,0	227.040,41	276.642,42	19,85	
5	12	3.259,80	2,29	4.905,31	22,6	176,3	298.640,26	345.169,89	-	

* Quantidade de trilhas abertas. ** Considera o percurso de ida e volta do Skidder no arraste de cada árvore, valor utilizado para calcular o custo. *** Cenários foram mesclados por terem pátios de estocagem alocados na mesma localização. n = quantidade de pátios.

Área impactada estimada

A área impactada se manteve similar entre os cenários analisados, no entanto, o Cenário 5 foi, em média, 9% inferior em comparação com os cenários otimizados, devido ao planejamento da infraestrutura de exploração ser alocada de forma regular e equidistante (sistemático) com intuito de reduzir a quantidade de infraestrutura. A abertura de estradas retilíneas pode ser interessante do ponto de vista financeiro, pois os custos de abertura são reduzidos, no entanto, podem ser onerosas se construídas em áreas com grande variação de relevo, onde será necessário a manutenção com frequência da

estrada para evitar os episódios de acidente por movimentação dos maquinários e erosão do solo (BRAZ, 2010, 1997).

O aumento de 2 km de estradas florestais dos cenários otimizados representa cerca de 2% da área total da área de estudo (Tabela 5). O aumento de estradas florestais nos cenários otimizados se deve à confecção do *layout* das estradas considerando os destaques topográficos. As estradas florestais são responsáveis por danos ambientais que podem ser intensos se decisões inadequadas forem tomadas, além de maiores custos de manutenção. A qualidade da estrada vai depender de vários fatores, como a frequência e a carga de transportada pelos veículos (EZZATI et al., 2021). Ao planejar estradas seguindo os destaques topográficos é esperado um aumento na quantidade e no custo de abertura, no entanto, as estradas se tornam mais seguras para a trafegabilidade de veículos e reduz custos com manutenção.

Embora houvesse aumento na quantidade de estradas, o percentual de área impactada entre os cenários analisados foram similares, devido a variação apenas de um pátio de estocagem e pouca variação na quantidade de trilhas abertas (Tabela 5). Isaac Júnior et al. (2021) usaram modelos de Programação Inteira Linear e Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo para alocar pátios e estradas para reduzir os impactos da exploração madeireira e comparou com o planejamento tradicional, como resultado encontrou alternativas com o mesmo número de pátios de estocagem que o planejamento tradicional e mais eficientes.

Tabela 5 - Área impactada estimada por infraestrutura de exploração.

Cenário	Pátio		Estrada		Trilhas		Total	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
1	0,60	0,36	3,15	1,86	6,68	3,96	10,42	6,18
2	0,65	0,39	3,38	2,00	6,54	3,88	10,57	6,27
3 e 4	0,65	0,39	3,33	1,98	6,74	4,00	10,73	6,36

Razão volume/distância

Um dos principais objetivos do modelo é buscar reduzir a distância de arraste das árvores de maior volume. Ao analisar o cálculo da razão, é possível verificar o somatório da razão do volume da árvore pela distância planejada de arraste em cada cenário. Quanto maior o volume da árvore em uma distância menor o valor da razão tende a aumentar.

Todos os cenários otimizados obtiveram resultados inferiores ao Cenário 5, com ganho médio de 25,22 no planejamento. Ao arrastar toras mais pesadas por distâncias

menores é esperado que a soma da razão tenha valores mais altos, porque indica maior quantidade do volume transportado aos pátios pela menor distância (Tabela 6).

Nas pesquisas de Lopes et al., (2009) e Miyajima et al. (2020), foi observado melhor eficiência do trator florestal em menores distâncias e maiores produtividades. Além disso, Barros et al., (2021) considerou o volume das árvores para avaliar o desempenho técnico e econômico do *Skidder* em um povoamento de Eucalipto, e observaram que a redução dos custos de operação do trator florestal está associada com a redução das distâncias de extração.

Nos trabalhos de Martinhago (2012) e Silva et al. (2018, 2020), em florestas nativas, não consideraram o volume como variável para limitar o arraste das árvores nos modelos de otimização, e pode implicar que árvores de grande porte sejam destinadas aos pátios de estocagem por distância maiores em função apenas da localização, e consequentemente, reduzir a eficiência no arraste das toras.

Tabela 6 - Tabela razão volume por distância.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3 e 4	Cenário 5
Razão (m ³ m ⁻¹)	34,18	37,36	37,85	29,12

Analytic Hierarchy Process - AHP

O método AHP tem o objetivo de auxiliar na escolha do melhor cenário. Os Cenários 3 e 4 obtiveram o melhor desempenho na avaliação (0,823) seguido dos Cenários 2 e 1. O resultado do Cenário 5 (0,131) foi discrepante em relação aos cenários otimizados, com diferença de 84% do cenário de melhor desempenho (Tabela 7).

As variáveis com maior influência são custo total e o custo da atividade de arraste. O arraste das toras representa cerca de 82% do custo total, sendo caracterizado como uma variável importante na tomada de decisão do melhor cenário. A área impactada tem relevância, e teve um aumento de 9% nos cenários otimizados. A variação do volume destinado aos pátios e a razão volume/distância são variáveis que permitem observar a uniformidade da distribuição do volume nos pátios e a otimização do arraste das toras, respectivamente. O Cenário 2 teve o melhor desempenho com pontuação de 84,3% acima do Cenário 5 (Tabela 7) e redução de custos estimada em 20,02% (Tabela 4).

As ferramentas de otimização têm o objetivo de reduzir o tempo de processamento computacional e de recursos humanos para identificar alternativas técnico-científicas para planejar a exploração florestal. O método AHP facilita a tomada de decisão do melhor

sistema porque é possível estabelecer um nível de hierarquia entre as variáveis baseando-se em dados científicos e julgamentos subjetivos (MARČETA et al., 2020).

Tabela 7 - Resultado dos valores das variáveis após a normalização e aplicação dos pesos do método AHP.

Cenário	Custos	Arraste	Área degradada	CV	Razão m ³ /m	Total
1	0,3735	0,1738	0,0387	0,1160	0,0307	0,7327
2	0,4780	0,2208	0,0198	0,0663	0,0500	0,8349
3 e 4	0,4740	0,2220	0,0000	0,0704	0,0530	0,8194
5	0,0000	0,0000	0,1310	0,0000	0,0000	0,1310

CONCLUSÃO

A alocação de pátios de estocagem através do modelo de otimização obteve redução no custo total da infraestrutura de exploração. A restrição de distância máxima de arraste associada ao volume da árvore proporcionou alocação de pátios em locais mais próximos das árvores superando as expectativas prévias. A restrição de volume máximo resultou em uniformidade no volume distribuído aos pátios, que permite eficiência na execução do cronograma planejado das atividades de exploração.

Modelos de otimização utilizados no planejamento de exploração em florestas naturais é um método científico que proporciona otimização do tempo de planejamento, da alocação das infraestruturas e análise de diferentes cenários.

Por fim, o Cenário 2 foi escolhido como melhor cenário pelo o método AHP, que melhora o processo de decisão de forma técnica, além de permitir analisar o panorama geral de desempenho entre os cenários.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará, à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBIC), à Pro-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) e à RRX Agroflorestal por ser possível realizar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, S. P.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, P. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

BARRETO, P. AMARAL, P.; VIDAL, E., UHL, C. **Custos e benefícios do manejo florestal para produção de madeira na Amazônia Oriental**. Belém, Pa: IMAZON, 1998, 48 p. (Série Amazônia, 10).

BARROS, A. P. das.; FREITAS, L. C.; LEITE, E. S.; LUZ, D. S.; SILVA, L. F.; SENA, B. S.; SANTOS, J. C. Influence of volume per tree and extraction distance on skidder performance in eucalyptus stands. *Scientia Forestalis*, v. 49, n. 131, p. 1–12, 2021.

BASKENT, E. Z.; KELES, S. Spatial Forest planning: A review. *Ecological Modelling*, v. 188, n. 2–4, p. 145–173, 2005.

BELFIORE, P. P.; FÁVERO, L. P. L. **Pesquisa operacional para cursos de administração, contabilidade e economia**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2012.

BRASIL, 2006. Lei nº 11.284 de 02 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF. Ministério do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 143, n. 43, p. 1, 2006.

BRAZ, E. M. **Support to management planning in Amazonia tropical**. 2010. Tese (Doutorado em Recursos Florestais e Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. **Planejamento de arraste mecanizado em floresta tropical**. Rio Branco, EMBRAPA - Acre, 1997.

BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P. DE; FIGUEIREDO, E. O. Manejo de precisão em florestas naturais. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**, p. 488–491, 2014.

DREZNER, Z.; HAMACHER, H. W. **Facility location: applications and theory**. 1. ed. Heidelberg, Germany. Berlin: Springer, 2004.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos. **Serviço Nacional De Levantamento e Conservação De Solos**, v. 10, n. 1, p. 83, 1979.

EZZATI, S.; PALMA, C. D.; BETTINGER, P.; ERIKSSON, L. O.; AWASTHI, A. An integrated multi-criteria decision analysis and optimization modeling approach to spatially operational road repair decisions. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 51, n. 3, p. 465–483, mar. 2021.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Logging and log transport in tropical high forest: A manual on production and cost**. 18. ed. Rome, Italy, 1974.

FERNANDES, A. P. D.; GUIMARÃES, P. P.; BRAZ, E. M.; HOEFLICH, V. A.; ARCE, J. E. Alternativas De Planejamento Para a Exploração Florestal. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 339, 2013.

FIGUEIREDO, E. O.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, M. V. N. **Manejo de Precisão em Florestas Tropicais: Modelo Digital de Exploração Florestal**. 21. ed. Rio Branco, AC: EMBRAPA, 2007.

FIGUEIREDO, E. O.; LIMA, Q. S. DE. **Coefficientes Técnicos para o Inventário e Manejo Florestal com Emprego do Modelo Digital de Exploração Florestal (Modelflora)**. Rio Branco, AC. 2008.

GAMA, J. R. C.; BENTES-GAMA, M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Manejo sustentado para floresta de várzea na Amazônia oriental. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 719–729, 2005.

HEKMATFAR, M.; PISHVAEE, M. Hub Location Problem. **Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies**, p. 243–270, 2009.

HOLMES, T. P.; HOLMES, T.; BLATE, G.; ZWEEDE, J.; PEREIRA, R.; BARRETO, P.; BOLTZ, F. **Custos e Benefícios Financeiros da Exploração Florestal de Impacto Reduzido em Comparação à Exploração Florestal Convencional na Amazônia Oriental**. Belém, PA: Fundação Floresta Tropical, v. 2. 2004.

HOSAKA, K.; ARUGA, K.; KONOSHIMA, M.; UEMURA, R. Optimizing Aggregation of Small Forest Stands for Thinning Operations: A Case Study in Nasushiobara, Tochigi Prefecture, Japan. **Small-scale Forestry**, v. 21, n. 3, p. 369–392, 2022.

IBM. **IBM ILGO CPLEX Optimizatin studio getting started with CPLEX**: Version 20 release 1. 2022. Disponível em: <https://ampl.com/products/solvers/solvers-we-sell/cplex/>. Acesso em: 01 jul. 2022.

ISAAC JÚNIOR, M. A.; BARBOSA, B. H. G.; GOMIDE, L. R.; CALEGARIO, N.; FIGEUREIDO, E. O.; MORAS-FILHIO, L. O.; NETO, E. A. Reduced-Impact Logging By Allocating Log-Decks Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm in Western Amazon. **Revista Árvore**, v. 45, p. 1–9, 2021.

JAEGGER, P. Tabela das espécies de madeira. Apostila, Engenharia Industrial da Madeira, União de Vitória, Paraná. Disponível em: <http://engmadeira.yolasite.com/resources/>. Acesso em: 22 fev. 2023.

KAYA, A.; BETTINGER, P.; BOSTON, K.; AKABULUTE, R.; UCAR, Z.; SIRY, J.; MERRY, K.; CIESZEWSKI, C. Optimisation in Forest Management. **Current Forestry Reports**, v. 2, n. 1, p. 1–17, 2016.

LOPES, S. E.; FERNANDES, H. C.; MINETTE, L. J.; SILVEIRA, J. C. M.; RINALDI, P. C. N. Avaliação técnica e econômica de um “skidder” operando em diferentes produtividades e distâncias de extração. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 6, p. 1621–1626, 2009.

MARČETA, D., PETKOVIC, V.; LJUBOJEVIĆ, D.; POTOČNIK I. Harvesting system suitability as decision support in selection cutting forest management in northwest Bosnia and Herzegovina. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 41, n. 2, p. 251–265, 2020.

MARTINHAGO, A. Z. **Otimização para a locação de pátios de estocagem para exploração de impacto reduzido na Amazônia brasileira**. 2012. Tese (Doutorado em Manejo e Colheita Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

MATOS, L. M. A.; MAGALHAES, E. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. A.; ARCE, J. E. Uma revisão crítica das ferramentas de pesquisa operacional aplicada ao planejamento florestal nos periódicos brasileiros. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 2035–2055, 2021.

MIYAJIMA, R. H., SOUZA-PESSOA, J. R.; FENNER, P. T.; SIMÕES, D. Eucalyptus extraction with grapple skidder: Operational productivity approach and production costs. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 48, n. 128, p. 1–13, 2020.

PARÁ. Secretaria de Estado e Meio Ambiente. **Plano de Manejo da Floresta Estadual do Pará**. Belém, Pa: IMAZON, 2010, 220 p.

PUTZ, F. E.; SIST, P.; FREDERICKSEN, T.; DYKSTRA, D. Forest Ecology and Management Reduced-impact logging: **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 1427–1433, 2008.

SAATY, L. T. **The Analytic Hierarchy Process**. Nova York, EUA: McGraw-Hill International Book Company, 1980.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Cadastro Nacional de Florestas Públicas - Atualização 2020**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/servico-florestal-brasileiro/cadastro-nacional-de-florestas-publicas/cadastro-nacional-de-florestas-publicas-atualizacao-2020>. Acesso em: 5 set. 2022.

SILVA, E. F.; SILVA, G. F.; FIGUEIREDO, E. O.; MENDONÇA, A. R.; SANTANA, C. J. O.; FIEDLER, N. C.; SILVA, J. P. N.; AGUIAR, M. O.; SANTOS, J. S. Optimized Forest planning: allocation of log storage yards in the Amazonian sustainable forest management area. **Forest Ecology and Management**, v. 472, n. May, p. 118231, 2020.

SILVA, E. F. **Alocação de pátios de estocagem em planos de manejo na Amazônia por meio de programação matemática**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santos, São Jerônimo, 2015.

SILVA, E. F.; SILVA, G. F. da; FIGUEIREDO, E. O.; BINOTI, D. H. B.; MENDONÇA, A. R. de; TORRES, C. M. M. E.; PEZZOPANE, J. E. M. Allocation of storage yards in management plans in the Amazon by means of mathematical programming. **Forests**, v. 9, n. 3, 2018.

SILVA, E. F. **Planejamento da exploração em florestas nativas manejadas da Amazônia por meio de pesquisa operacional**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, São Jerônimo, 2019.

SILVA, J. C.; DE ALMEIDA, A. N.; POMPERMAYE, R. D. S. Análise Estratégica do Manejo Florestal Na Amazônia Brasileira. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 341, 2014.

YOU, M., XIAO, Y.; ZHANG, S.; ZHOU, S.; YANG, P.; PAN, X. Modeling the capacitated multi-level lot-sizing problem under time-varying environments and a fix-and-optimize solution approach. **Entropy**, v. 21, n. 4, p. 1–15, 2019.