

Covering Problem Applied for Allocation of Storage Yards in Sustainable Forest Management (SFM)

Dalvan Ribeiro de Almeida
Instituto Federal do Espírito Santo
Serra, Espírito Santo, BR
dalvanra@gmail.com

Marcelo Otone Aguiar
Universidade Federal do Espírito
Santo
Alegre, Espírito Santo, BR
marcelo.aguiar@ufes.br

Danilo de Paula e Silva
Instituto Federal do Espírito Santo
Serra, Espírito Santo, BR
danilo.silva@ifes.edu.br

Abstract

Context: Providing resources for a growing population is a challenge. Sustainable forest management emerges as an alternative for resource extraction from native forests in a planned manner, ensuring balance in the activity.

Problem: Although SFM brings benefits, companies often plan their logging operations empirically, failing to achieve the best balance between resource efficiency and forest preservation. The optimal location of wood storage yards influences the construction of roads and skid trails, offering both economic and environmental benefits by minimizing the hauling distance for timber.

Solution: An adaptation of the covering problem is proposed to create an optimization model for the allocation of wood storage yards within the scope of SFM.

IS Theory: The forest ecosystem can be seen as a complex system, where ecological, social, and economic variables are considered to sustainably optimize resources.

Method: To evaluate the effectiveness of optimizing yard allocation, a quantitative study was conducted using a computational model applied to a dataset provided by Aguiar et al. (2020). A comparative analysis approach was used to compare the model's results with the data from the aforementioned study.

Summary of Results: The results demonstrate that the model was effective in determining optimal locations for the yards. Compared to the p-median problem, it offers the additional benefit of eliminating the need to specify the number of yards, allowing for generalization to other datasets.

Contributions and Impact on IS: This work shows how intelligent systems can optimize complex processes, promoting sustainable natural resource management and technological innovation in the forestry sector. It serves as a foundation for future studies in optimization and environmental management.

CCS Concepts

• **Applied computing** → Multi-criterion optimization and decision-making; **Environmental sciences**; • **Mathematics of computing** → *Solvers*; • **Computing methodologies** → **Modeling methodologies**.

Keywords

Optimization, Forest, management, Coverage, location, problem

1 Introdução

1.1 Contextualização

O Brasil é o país com a maior riqueza de plantas no mundo, abrangendo cerca de 46 mil espécies de plantas, algas e fungos. Quase metade, 43%, é exclusiva (endêmica) do território nacional[3]. Esse número não vai parar de crescer tão cedo uma vez que novas espécies são identificadas e descritas continuamente em revistas científicas. Em média, 250 novas espécies são descritas por ano [16]. Essa imensa riqueza de espécies resulta principalmente da dimensão continental do país e da diversidade de ecossistemas que amplia a variedade morfológica das espécies [22].

Essa grande diversidade favorece a produção madeireira como importante atividade econômica, destaca-se, o tamanho da área florestal brasileira, cerca de 58% do território nacional é composto por florestas nativas e cultivadas, sendo que, 98,5% dessa área é composta por florestas não cultivadas, isso coloca o Brasil atrás apenas da Rússia em cobertura vegetal [29].

A imensa maioria da área de floresta não cultivada está localizada no bioma Amazônia, cerca de 67,45% do total [32], conforme é apresentado na Tabela 1. Esses dados demonstram a importância econômica da exploração madeireira para o país, além da necessidade de aprimoramento das técnicas de extração para aumentar a sustentabilidade da atividade, já que a floresta amazônica é essencial para a regulação do ecossistema mundial [27].

Table 1: Área de floresta do Brasil

Bioma	Área(ha)	% do total
Amazônia	328,069,406.00	67.45%
Caatinga	43,368,931.00	8.92%
Cerrado	76,538,248.00	15.75%
Mata Atlântica	29,621,390.00	6.09%
Pampa	3,265,763.00	0.67%
Pantanal	5,453,972.00	1.12%
Total	486,317,710.00	100.00%

A produção econômica por meio da exploração florestal sustentável, ainda está aquém do potencial que tem, uma vez que 39,2 milhões de hectares de florestas públicas federais ainda não foram concedidas para exploração, se 23% da área que ainda não é explorada, fosse colocada em exploração, seria possível aumentar a produção madeireira em cerca de 5,3 milhões de m³ de madeira, o que equivale a toda produção do ano de 2011 [29].

A Amazônia, um dos maiores e mais diversos biomas do planeta, enfrenta hoje desafios crescentes, com destaque para a exploração

ilegal de madeira, que ameaça sua rica fauna e flora. Ao longo da história, a madeira desempenhou um papel crucial no desenvolvimento humano, servindo como um recurso valioso em vários setores, incluindo comércio, construção e indústria. O manejo florestal sustentável é crucial para a preservação dos recursos naturais e a utilização responsável da madeira [21].

Cabe ressaltar que o manejo florestal descrito nesse trabalho não se confunde, nem se assemelha com a grilagem, que é atividade criminosa onde o bem comum é transformado em propriedade particular de forma ilegal, gerando desmatamento [24], atividade essa prevista como crime contra a administração pública, punível com pena de 1 a 4 anos de reclusão e multa [4]. Isso demonstra a necessidade de que se devolvam trabalhos cujos objetivos sejam fortalecer a exploração sustentável e combater o desmatamento e a grilagem de terras brasileiras.

A legislação brasileira para concessão de áreas para exploração é dispersa e regulamentada por diversos órgãos governamentais. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) normatizou esse processo por meio do Ato nº 1, de 24 de abril de 2007 [6], em conformidade com a Instrução Normativa nº 5, de 11 de dezembro de 2006, do Ministério do Meio Ambiente (MMA) [5], e com a Resolução nº 406, de 2 de fevereiro de 2009, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) [7].

Além disso, a Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que institui o novo Código Florestal, reforça a necessidade de desenvolvimento sustentável, incentivando a inovação no uso do solo, da água e dos recursos florestais [8]. Essa legislação busca equilibrar a exploração econômica com a preservação ambiental, promovendo práticas que garantam a conservação dos ecossistemas e o aproveitamento responsável dos recursos naturais.

O manejo florestal é definido como um tipo de exploração madeireira realizada de forma seletiva e planejada, o que a torna uma atividade complexa e que exige profissionalização, mas que resulta na minimização dos danos à floresta remanescente. As boas Práticas de planejamento demandam investimentos, especialmente em mão de obra, porém, os custos podem ser compensados ou excedidos pelo uso mais eficiente dos recursos. O *MFS* adiciona ao planejamento atividades para assegurar a compatibilidade social no uso das florestas [30]. Diversos trabalhos destacam a importância da otimização no *MFS*, sendo alguns deles: [35], [1], [18] e [31].

1.2 Descrição do problema

Um dos grandes desafios atualmente, é fornecer insumos para uma população crescente. Com o material de origem florestal não é diferente, o aumento da demanda, atrelada ao estresse mundial causado principalmente diante da redução dos recursos florestais, pelas mudanças climáticas, desertificação, poluição ambiental, entre outros, gera uma pressão política e ética para que cada vez mais as atividades exploratórias de recursos naturais sejam eficientes e sustentáveis [25]. O manejo florestal sustentável *MFS* apresenta-se como importante técnica para minimizar o impacto da extração de madeira, promovendo a sustentabilidade da atividade. A tarefa básica do *MFS* é direcionar o planejamento da exploração para o corte seletivo, em que é feita a remoção apenas de indivíduos específicos, que tenham potencial para comercialização e que atendam os critérios do órgãos ambientais competentes [15].

A habilitação para concessão de área para exploração depende do plano operacional anual (*POA*). O *POA* é um documento que deve ser apresentado aos órgãos competentes contendo a descrição detalhada de toda a atividade, inclusive, a demarcação das áreas de construção de estradas, trilhas de arraste, pátios de armazenamento, demarcação das árvores que serão extraídas, entre outras [15].

O planejamento empírico da construção das instalações necessárias para exploração da atividade comercial, da forma como é feito atualmente em muitos casos, pode, além de impactar economicamente, degradar o meio ambiente, diminuindo a sustentabilidade e retorno financeiro.

Com isso, faz-se necessário, o uso de técnicas de otimização para determinação do melhor local para construção de estradas, trilhas e pátios de estocagem. A localização ideal dos pátios de estocagem impacta diretamente na construção de estradas, o que gera um benefício duplo ao projeto quando otimizado [1]. A Figura 1, retirada de um *POA*, apresenta o mapa de uma unidade de produção anual localizada na cidade de Altamira-PA, nela pode-se observar as estradas, primárias e secundárias, e os pátios de estocagem.

A localização das instalações é uma tarefa custosa e difícil de reverter [36]. A disposição dos pátios de estocagem implica diretamente na elevação dos custos de produção, na variação da disposição das estradas, no rendimento do arraste da tora, atividade extremamente onerosa, e na geração de impactos ambientais [12]. Além disso, fica evidente a necessidade de se definir de forma precisa a localização dos pátios de estocagem.

1.3 A proposta

Com a crescente necessidade de reduzir o custo de extração de madeira e, ao mesmo tempo, garantir a sustentabilidade da atividade, métodos puramente empíricos de tomada de decisão mostram-se insuficientes e precisam ser substituídos por abordagens computacionais mais eficientes e otimizadas. Este trabalho propõe, um modelo computacional de otimização que visa minimizar os custos envolvidos na extração de madeira, ao mesmo tempo em que considera as exigências ambientais e operacionais da atividade florestal.

Este assunto foi amplamente investigado nos últimos anos, como em (CONTREERAS; CHUNG, 2007 [11]; PHILIPPART et al., 2012 [26]; SILVA et al., 2018a [14]; SILVA et al., 2018b [35]; SILVA et al., 2020 [34]), contudo, essa área ainda carece de estudos que aprofundem a investigação em aspectos relevantes que são limitações comuns, como: a dimensão das áreas de exploração, a determinação do quantitativo de pátios a serem abertos, entre outras. Como exemplo, o estudo de D.M. Gouveia et al., 2018 [17], considerou uma área de 11,25 ha em seu maior cenário, em contraste aos 328 ha deste estudo. Esse é um importante fator tendo em vista que a complexidade da busca por soluções crescer exponencialmente a medida em que o tamanho da área de interesse aumenta[1].

A Figura 2 apresenta o fluxograma da estrutura proposta para este trabalho, os dados do inventário florestal, somado a outros dados de interesse, foram pré processados e inseridos em um *Dataset*, para ser submetido ao modelo de otimização, objetivando minimizar a quantidade de pátios de estocagem necessários, mas garantindo as restrições do *MFS*. Em seguida os dados foram tratados estatisticamente, e comparados com resultados de pesquisas similares, e com a definição empírica utilizada no projeto original.

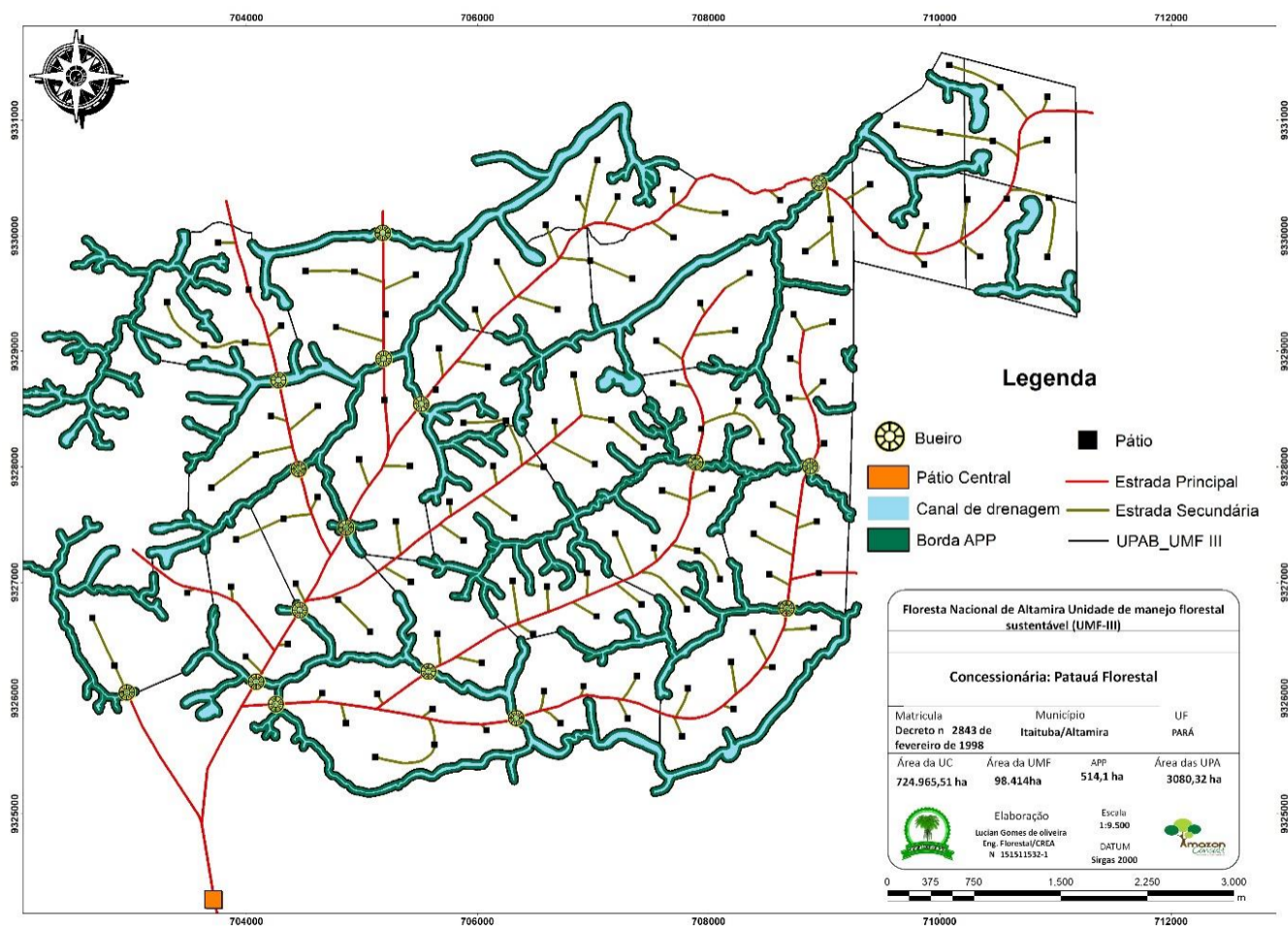


Figure 1: Mapa da unidade de produção anual da cidade de Altamira-PA, Pataúá florestal LTDA, via Serviço Florestal Brasileiro. (<https://www.gov.br/florestal/pt-br>).

O trabalho de Aguiar [1] modelou o problema de localização de instalações como uma extensão do problema *p-mediana*, onde, dado um conjunto de instalações potenciais, o problema consiste em encontrar um subconjunto de modo que o custo de servir todos os clientes seja minimizado [28]. Uma das limitações do estudo realizado no trabalho supracitado é que a abordagem utilizada não é capaz de reduzir o número de instalações, mesmo que isso seja possível na prática.

Para suprir essa lacuna, o problema de alocação de pátios de estocagem foi modelado como uma adaptação do problema de localização de cobertura (PLC), também conhecido como *Covering Problem*.

O objetivo do PLC é buscar o número máximo de indivíduos que podem ser atendidos, dado um número limitado de instalações, além de garantir que nenhum ponto de demanda estará além de uma determinada distância de serviço de cada instalação, com isso, é possível plotar uma curva de custo-benefício.

Assim, uma boa estratégia é localizar as instalações de forma a minimizar o número de pátios a serem abertos para atender todas as demandas [10].

O PLC foi introduzido pela primeira vez em 1965, para o problema de localização de viaturas policiais em uma rodovia [13]. A principal diferença entre o modelo *p-mediana* e o PLC é que o *p-mediana* é útil para encontrar locais onde minimizar a distância média percorrida é suficiente, para isso, basta definir dentro um conjunto de candidatos, os que melhor atendam o problema. No PLC não define-se uma quantidade de pontos possíveis, mas, define-se uma distância aceitável, e busca-se minimizar os custos dentro dessa distância. Nessas situações, a preocupação principal é garantir a "cobertura". Isso significa que uma demanda é considerada coberta se puder ser atendida dentro de uma distância específica [23].

O problema de localização de instalações pode ser aplicado em diversas áreas.

A localização de caixas para atendimento bancário automatizado, cujo o objetivo era aumentar a cobertura da população, minimizando os custos da operação [2].

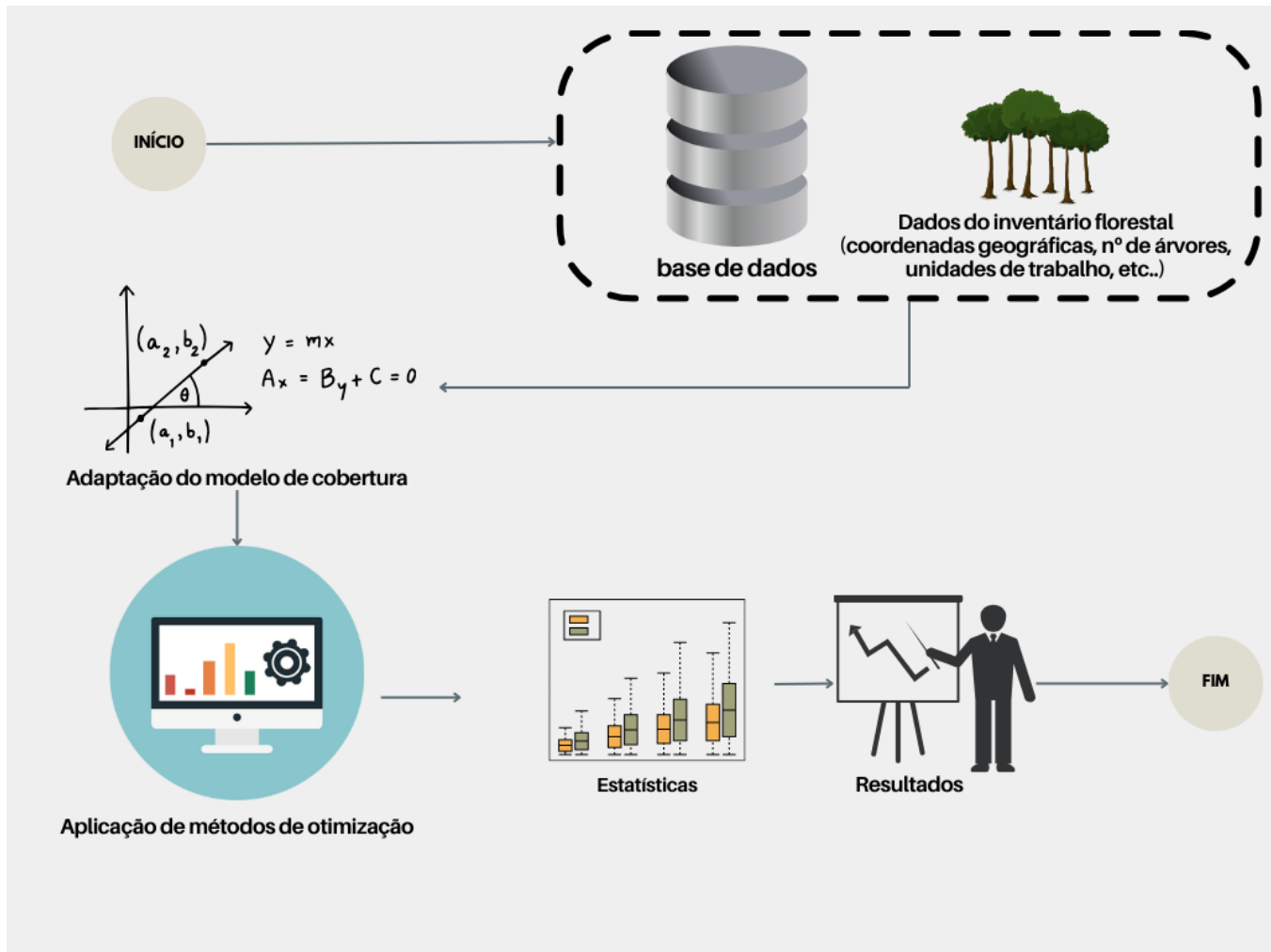


Figure 2: Fluxograma da proposta deste trabalho

Outro problema relevante, é a localização de uma rede de telefones públicos, utilizando uma variante do PLC para minimizar os custos de operação, buscando minimizar a quantidade de aparelhos disponíveis para a utilização, sempre atendendo as restrições que a legislação impõe e buscando maximizar o lucro da empresa. De forma semelhante a proposta deste trabalho, Foi utilizado um banco de dados com dados reais de uma companhia de telefonia, encontrando soluções viáveis para o problema [20].

Também foi aplicado o PLC para as instalações de saúde na Malásia, utilizando CPLEX, obtendo uma melhora na solução, aumentando a cobertura em 17% [33].

Este trabalho está estruturado em seis seções. Na seção 1 apresenta-se a contextualização sobre o tema, descrevendo o problema com as justificativas para a realização da pesquisa. A seção 2 expõe a metodologia de pesquisa adotada além da definição da base de dados e o modelo matemático utilizado. Na seção 3, é realizada uma descrição das formas de comparação de resultados. A seção 4 descreve os experimentos realizados. Os dados dos resultados

são apresentados na seção 5. E por fim, a seção 6 apresenta uma conclusão sobre o trabalho realizado.

2 Metodologia

As seguintes fases metodológicas foram implementadas para conduzir o presente trabalho: definição e adaptação da base de dados existente; adaptação e aplicação do modelo de otimização; calibração e processamento de parâmetros; e realização de análises e apresentação dos resultados. A Figura 2 ilustra as etapas essenciais no desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 Definição da base de dados

A Unidade de Manejo Florestal (UMF) que foi usada como base do estudo, está localizada na coordenada geográfica 1°45'23" S e 56°34'21" O, nos municípios de Terra Santa e Oriximiná, no Estado do Pará, Brasil. Com 26.897,96 ha a área pertence a Floresta Nacional de Saracá-Taquera (FLONA), e foi concedida a empresa EBATA Produtos Florestais por meio da concessão florestal, decreto nº

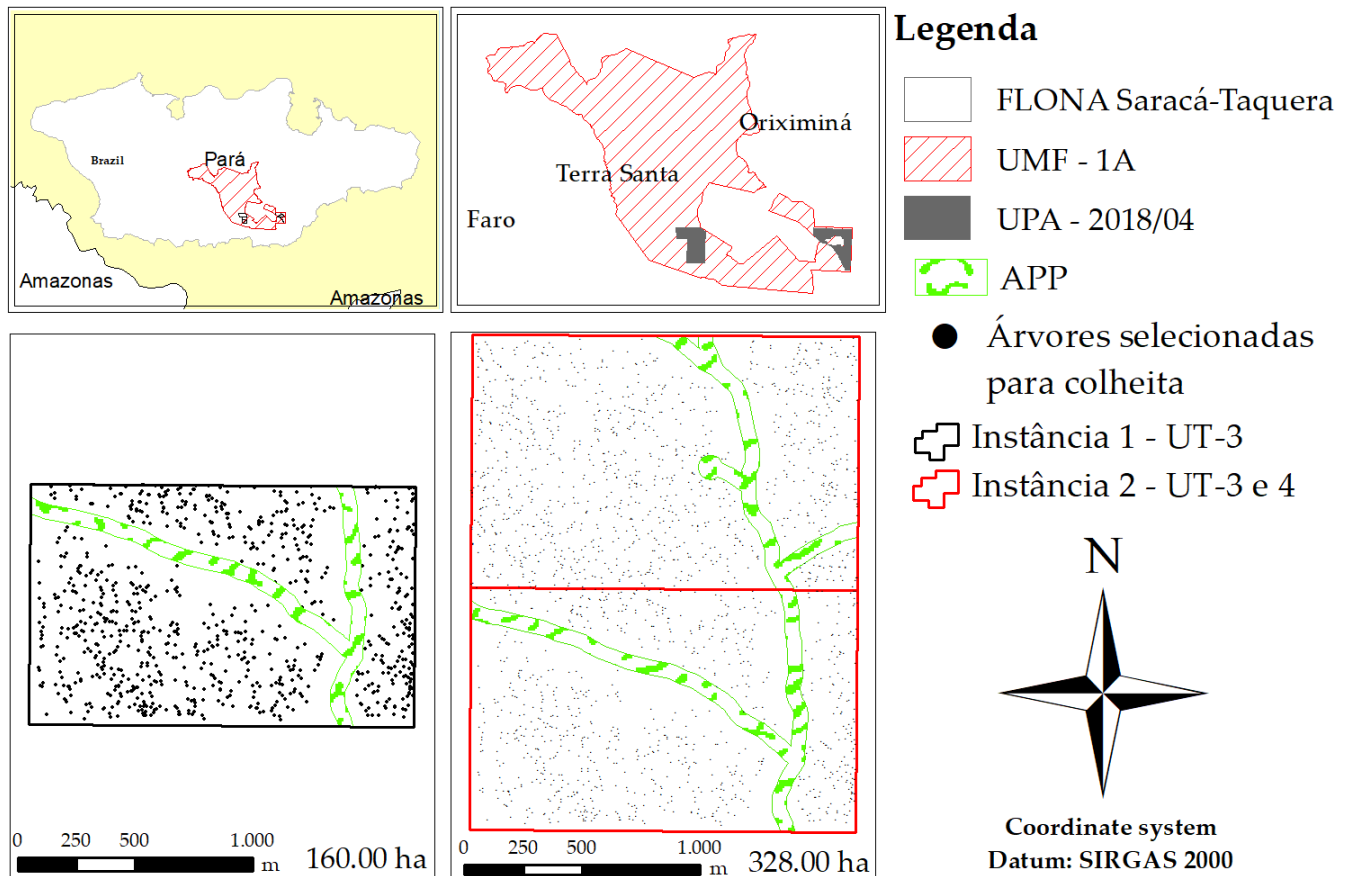


Figure 3: Área de estudo

02/2012, promovida pelo Serviço Florestal Brasileiro, de acordo com a legislação vigente. A Unidade de Produção Anual (UPA) que deu origem aos dados desse trabalho é denominada UPA 4/2018 e corresponde à segunda unidade de produção realizada na UMF 1A da Floresta Nacional de Saracá-Taquera (Lote-Sul). A área total desta UPA é 1.133,08 ha e corresponde a 4,21% da área total desta UMF. A Figura 3 apresenta o mapa da UPA 4/2018 em relação a UMF 1A, além de destacar a divisão das Unidades de trabalho (UT) e os pontos com as árvores selecionadas para colheita. Os dados utilizados são provenientes das UT-3 e UT-4. A instância 1 corresponde aos dados da área da UT-3, enquanto a instância 2 corresponde aos dados da área das UT-3 e UT-4.

As informações das árvores comerciais foram tratadas de forma similar a forma usada por Aguiar [1], obtendo uma matriz ($n \times m$) com as distâncias entre cada árvore e os pátios de estocagem. Durante o pré-processamento a matriz de distâncias foi convertida em uma lista de vetores, onde cada vetor armazena os pátios que são possíveis para determinada árvore. Um pátio foi considerado possível se a sua distância em relação a árvore é menor ou igual a 379,45 m, distância comumente usada no MFS, dessa forma, a restrição de distância máxima de arraste foi tratada no pré-processamento e removida do modelo original do problema de cobertura. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de processamento para cada instância.

Table 2: Parâmetros das instâncias de trabalho

Parâmetro	Instância 1	Instância 2
Área (ha)	160	328
Número de árvores de interesse	820	1864
Volume total (m ³)	3600,61	7563,64
Número de possíveis pátios	1666	3471
Capacidade máxima de cada pátio (m ³)	257,19	302,55
Flexibilidade da capacidade (%)	10	10
Distância máxima de arraste (m)	379,45	379,45

2.2 Modelo matemático

O problema de localização de cobertura clássico visa minimizar o número de "facilidades" alocadas em uma rede de modo que cada ponto (ou nó) esteja coberto, ou seja, a uma distância máxima pré-determinada de uma instalação. Assim, um nó é considerado "coberto" quando a distância até a instalação mais próxima não excede essa distância limite. Este tipo de problema também pode ser aplicado em áreas como planejamento urbano, onde pontos de interesse (escolas, hospitais) precisam estar acessíveis a toda a população dentro de uma área delimitada [10].

O modelo matemático do problema considera um conjunto de nós e de possíveis localizações para as facilidades, procurando uma alocação que maximize a cobertura ao mesmo tempo que minimiza os custos associados à instalação e manutenção dessas facilidades. O modelo matemático para o problema de cobertura clássico é apresentado a seguir:

$$\min \sum_{j \in J} Y_j \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in N_i} Y_j \geq 1, \forall i \in I \quad (2)$$

$$Y_j \in (0, 1), \forall j \in J \quad (3)$$

onde:

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se o nó demandado está coberto} \\ 0, & \text{se o nó não estiver coberto} \end{cases}$$

$$N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$$

S é a distância máxima de serviço

I é o conjunto de nós de demanda

J é o conjunto de localização das potenciais facilidades

O modelo clássico foi adaptado para o problema em questão, assim, uma facilidade é um pátio para estocagem e um nó é uma árvore de interesse comercial, além da adição da restrição de capacidade máxima dos pátios e remoção da restrição de distância máxima de arraste, uma vez que esta foi tratada no pré-processamento. A seguir é apresentado o modelo de cobertura adaptado para este estudo.

$$\min \sum_{j \in J} Y_j \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in N_i} Y_j \geq 1, \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I_j} X_{ij} \leq C_j Y_j, \forall j \in J \quad (3)$$

$$Y_j \in (0, 1), \forall j \in J \quad (4)$$

onde:

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{se o pátio é utilizado} \\ 0, & \text{se o pátio não é utilizado} \end{cases}$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a árvore } i \text{ é coberta pelo pátio } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

I é o conjunto de árvores de interesse

J é o conjunto dos potenciais pátios

C_j é a capacidade do pátio j

A função objetivo, (1), minimiza o número total de pátios necessários, enquanto o conjunto de restrições, (2), garante que sempre haverá no mínimo uma instalação dentro da distância máxima de arraste, S , de cada árvore. O conjunto de restrições, (3), garante que não se exceda a capacidade máxima de cada pátio. O conjunto de restrições, (4), garante que não haverá localização de instalações parciais. O

modelo matemático original do problema de cobertura foi adaptado, acrescentando a restrição de capacidade máxima de cada pátio.

3 Método de comparação

O desempenho dos métodos de otimização pode ser medido por diversos aspectos. A convergência para o valor ótimo é uma medida de desempenho fundamental. Outra opção para comparação da eficiência dos algoritmos é avaliar o número de chamadas ao método que calcula a função objetivo, esse fator está diretamente relacionado a convergência do algoritmo. E por último, o tempo computacional necessário para que o método encontre a solução ótima, pode refletir a simplicidade do algoritmo [9].

4 Experimento

Cada instância do problema de programação linear inteira binária descrito na seção 2, foi submetida ao solver ILOG CPLEX Optimization Studio 22.1.1®, limitado a 1440 min (24h) de processamento. O modelo foi implementado na linguagem OPL (*Optimization Programming Language*) e configurado para utilizar os parâmetros padrões do CPLEX. Os dados foram estruturados em arquivos de entrada .dat, contendo informações sobre as árvores, pátios e restrições de capacidade. A estrutura do código seguiu uma abordagem modular, separando a definição dos parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições. Para isso, foi utilizado um ultracompacto da marca Positivo com AMD Ryzen™ 5 PRO 4000 Series com 6 núcleos e 3.3GHz de velocidade, 16GB de memória RAM e 256 GB de SSD, rodando Windows 10 pro.

5 Resultados

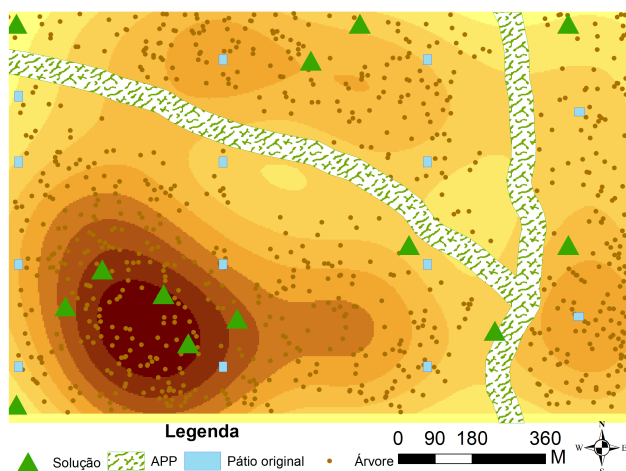
Nesta pesquisa, foram utilizadas duas instâncias distintas, descritas na Tabela 2, cada uma representando uma área de tamanho diferente, para permitir uma análise comparativa. Os resultados mostraram que a complexidade do modelo de otimização, refletida no número de variáveis e restrições, variou consideravelmente entre as instâncias, considerando que o problema de alocação de pátios é classificado como um problema NP-difícil [19], o que significa que sua resolução depende diretamente do tamanho da área analisada, número de possíveis pátios e quantidade de árvores comerciais.

A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados, nela é possível observar o número de variáveis, restrições, tempo para se obter a solução, o valor da função objetivo, e o número de iterações para cada instância. O resultado demonstra também, a necessidade de se considerar instâncias maiores na execução de experimentos para esse tipo de problema, neste caso em específico, com o dobro do tamanho da área da instância um, a instância dois necessitou de 3000% mais tempo de execução. É importante destacar que o pré-processamento diminuiu em 500% o número de variáveis para a instância um, viabilizando a execução do experimento, uma vez que, a instância dois sem o pré-processamento esgotou toda memória disponível.

A dimensão dos pátios de estocagem é de 20 x 25 m em áreas regulares e em áreas irregulares onde não é possível um padrão de distribuição, podem ter dimensões variadas (20 x 30 ou 25 x 30), a fim de comportar o volume de sua área de abrangência [32]. A solução comumente utilizada, e que foi empregada no projeto de extração original, é dispor os pátios de forma simétrica, o que não

Table 3: Resultados dos experimentos

Parâmetro	Instância 1	Instância 2
Área(ha)	116	328
Número de árvores	820	1864
Capacidade dos pátios(m³)	257,19	302,55
Flexibilização da capacidade	10%	10%
Função objetivo	13	25
Variáveis	272908	830657
Restrições	3984	9680
Tempo da solução (s)	2564	86400
Iterações	522764	15107229

**Figure 4: Resultado da instância 1**

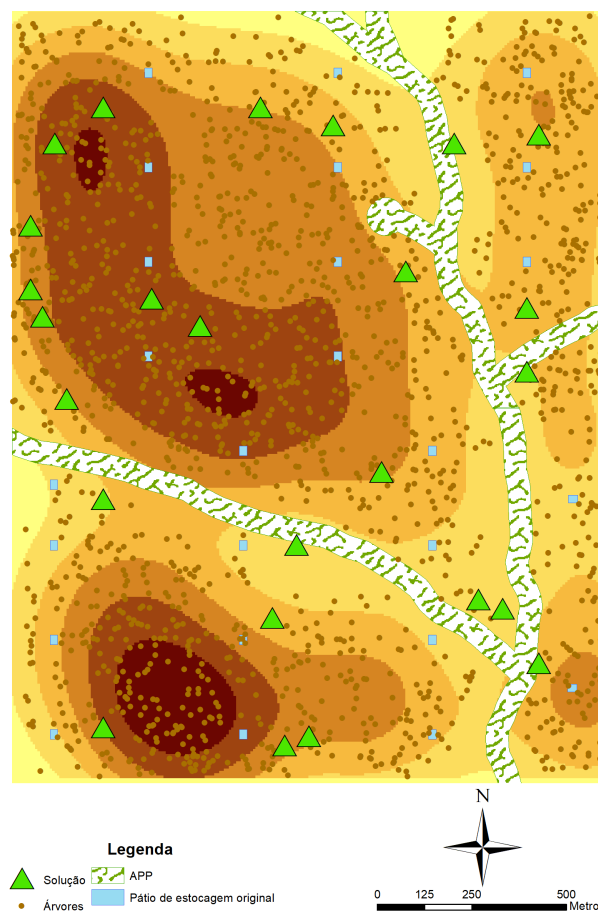
leva em conta a dispersão do volume das árvores, podendo ocasionar desperdício ou superlotação de pátios. Os resultados mostram que o modelo é adequado para otimização da localização dos pátios.

Foi possível reduzir em 7,14% a quantidade de pátios necessários para instância 1, se comparado ao projeto original e ao trabalho de Aguiar[1], isso representa 500m² a mais de área completamente preservada. Para a instância 2, a solução encontrada foi de 25 pátios em 24 horas de execução. Destaca-se que, o modelo não se restringe a fornecer a quantidade de pátios mínimos necessários para cada instância, também é possível obter o local para construção do pátio de forma a respeitar as restrições.

As Figuras 4 e 5 apresentam a localização dos pátios de cada instância respectivamente, comparados com a definição da localização dos pátios no projeto original, o mapa de calor nas referidas figuras apresenta a concentração do volume de madeira em cada região. É possível observar uma concentração maior de pátios nas regiões que possuem um maior volume de madeira, como esperado.

6 Conclusão

Este trabalho apresentou uma solução para uma parte crítica do desafio de equilibrar exploração economicamente viável de produtos florestais com a preservação ambiental. A escolha do local ideal para construção de pátios de estocagem no MFS, influencia diretamente

**Figure 5: Resultado da instância 2**

na construção de estradas e trilhas de arraste o que pode impactar econômica e ambientalmente toda operação. A pesquisa propõe uma adaptação do modelo de cobertura para minimizar a quantidade de pátios necessários, respeitando as restrições inerentes no MFS.

Os resultados mostram que o modelo foi eficiente em definir a melhor localização para a construção dos pátios, reduzindo o impacto ambiental em 7,14%, além da redução dos custos da operação.

Esses resultados reforçam a necessidade de se investir em sistemas inteligentes na gestão de recursos naturais, contribuindo para sustentabilidade e inovação no setor florestal.

Em trabalhos futuros o modelo poderá ser adaptado para outras restrições, ou submetido a métodos não exatos, uma vez que ficou clara a dificuldade de se obter soluções exatas em grandes áreas. Também é possível desenvolver um modelo multiobjetivo, que busque minimizar tanto a quantidade de pátios necessários quanto a distância total de arraste até cada pátio.

Acknowledgments

Os autores agradecem a FAPES/UnAC (Nº FAPES 1228/2022 P 2022-CD0RQ, Nº SIAFEM 2022-CD0RQ) pelo apoio financeiro dado por

meio do Sistema UniversidaES. E a FAPES, por meio do projeto 850/2023 - P:2023-DLP0J.

References

- [1] Marcelo Otone Aguiar, Gilson Fernandes da Silva, Geraldo Regis Mauri, Evandro Ferreira da Silva, Adriano Ribeiro de Mendonça, Jeferson Pereira Martins Silva, Rodrigo Freitas Silva, Jeangelis Silva Santos, Gabriel Lessa Lavagnoli, and Evandro Orfano Figueiredo. 2020. Metaheuristics applied for storage yards allocation in an Amazonian sustainable forest management area. *Journal of Environmental Management* 271 (2020), 110926.
- [2] Alaa Alhaffa, Omar Al Jadaan, Wael Abdulal, and Ahmad Jabas. 2011. Rank Based Genetic Algorithm for solving the Banking ATM's Location Problem using convolution. In *2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics*. 6–11. <https://doi.org/10.1109/ISCI.2011.5958874>
- [3] Fabiana L. Ranzato and Filardi, Fábio de Barros, José Fernando A. Baumgratz, Carlos E.M. Bicudo, Taciana B. Cavalcanti, Marcos A. Nadruz Coelho, Andrea F. Costa, Denise P. Costa, Renato Goldenberg, and et al. 2018. Brazilian Flora 2020: Innovation and collaboration to meet Target 1 of the Global Strategy for Plant Conservation (GSPC). *Rodriguésia* 69, 4 (Oct 2018), 1513–1527. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201869402>
- [4] Brasil. 1979. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm.
- [5] Brasil. 2006. Instrução Normativa nº 5 de 11 de dezembro de 2006. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=13/12/2006&jornal=1&pagina=155&totalArquivos=232>.
- [6] Brasil. 2007. Norma de Execução nº 1, de 24 abril de 2007. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=113233>.
- [7] Brasil. 2009. Resolução Nº 406, Dde 02 de fevereiro de 2009. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=578.
- [8] Brasil. 2012. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm.
- [9] Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung, and Song-Yop Hahn. 1998. A study on comparison of optimization performances between immune algorithm and other heuristic algorithms. *IEEE Transactions on Magnetics* 34, 5 (1998), 2972–2975. <https://doi.org/10.1109/20.717694>
- [10] Richard Church and Charles ReVelle. 1974. The maximal covering location problem. In *Papers of the regional science association*, Vol. 32. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 101–118.
- [11] Marco Contreras and Woodam Chung. 2007. Erratum: A computer approach to finding an optimal log landing location and analyzing influencing factors for ground-based timber harvesting. *Canadian Journal of Forest Research* 37 (10 2007), <https://doi.org/10.1139/X07-916>
- [12] Gisele Nogueira Peralta Corso, Alexandre de Freitas Carneiro, José Arilson de Souza, Wellington Silva Porto, and Emanuel Fernando Maia de Souza. 2018. CUSTOS NO MANEJO FLORESTAL: um caso na região amazônica ocidental brasileira, rondonia. *TÓPICOS DE GESTÃO, SUSTENTABILIDADE E EDUCAÇÃO* (2018), 9.
- [13] Reza Zanjirani Farahani, Nasrin Asgari, Nooshin Heidari, Mahtab Hosseininia, and Mark Goh. 2012. Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering* 62, 1 (2012), 368–407.
- [14] Evandro Ferreira da Silva, Gilson Fernandes Da Silva, Evandro Orfanó Figueiredo, Daniel Henrique Breda Binoti, Adriano Ribeiro de Mendonça, Carlos Moreira Miquelino Elete Torres, and José Eduardo Macedo Pezzopane. 2018. Allocation of Storage Yards in Management Plans in the Amazon by Means of Mathematical Programming. *Forests* 9, 3 (2018). <https://www.mdpi.com/1999-4907/9/3/127>
- [15] Evandro Ferreira da Silva, Gilson Fernandes da Silva, Evandro Orfanó Figueiredo, Adriano Ribeiro de Mendonça, Cesar Junio de Oliveira Santana, Nilton César Fiedler, Jeferson Pereira Martins Silva, Marcelo Otone Aguiar, and Jeangelis Silva Santos. 2020. Optimized forest planning: allocation of log storage yards in the Amazonian sustainable forest management area. *Forest Ecology and Management* 472 (2020), 118231. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118231>
- [16] Rafaela Campostrini Forzza, Vinicius Castro Souza, José Rubens Pirani, and Daniela Zappi. 2016. A maior diversidade de plantas do mundo: botânicos registram 46 mil espécies e identificam em média 250 por ano no Brasil. [Depoimento a Carlos Fioravanti].
- [17] Débora Monteiro Gouveia, Julio Eduardo Arce, Eduardo da Silva Lopes, Fabiane Aparecida Retslaff Guimaraes, Rodrigo dos Santos Lima, and Luciana Di Paula Assunção Pereira. 2024. Optimization of storage yards in sustainable forest management in the amazon. *Journal of Environmental Management* 372 (2024), 123280. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123280>
- [18] Verônica Satomi Kazama, Ana Paula Dalla Corte, Renato Cesar Gonçalves Robert, Carlos Roberto Sanquetta, Julio Eduardo Arce, Kauê Augusto Oliveira-Nascimento, and Daniel DeArmond. 2021. Global review on forest road optimization planning: Support for sustainable forest management in Amazonia. *Forest Ecology and Management* 492 (2021), 119159. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119159>
- [19] Bernhard H Korte, Jens Vygen, B Korte, and J Vygen. 2011. *Combinatorial optimization*. Vol. 1. Springer.
- [20] Leonardo Junqueira Lustosa, Cristina de las Nieves Araneda-Fuentes, and Daniel de Mello Schaefer. 2009. Redimensionamento de redes de telefones públicos urbanos. *Gestão & Produção* 16, 1 (Jan 2009), 152–162. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2009000100014>
- [21] Rômulo Moro and Pedro Paula Filho. 2024. Comparativo entre modelos de segmentação para identificação de espécies florestais. In *Anais do XXI Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas* (Foz do Iguaçu/PR). SBC, Porto Alegre, RS, Brasil, 420–423. <https://doi.org/10.5753/latinware.2024.245731>
- [22] Claudio Niccioletti and Fraga. 2016. A maior diversidade de plantas do mundo.
- [23] Susan Hesse Owen and Mark S. Daskin. 1998. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research* 111, 3 (1998), 423–447. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6)
- [24] Eliane Tomiasi Paulino. 2017. A liquidação das terras públicas no brasil: Contextos, pretextos e passivos territoriais em face da lei 13.465/2017. *Boletim Goiano de Geografia* 37, 3 (2017), 391–408.
- [25] Changhui Peng. 2000. Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management. *Environmental Impact Assessment Review* 20, 4 (2000), 481–501.
- [26] Julien Philippart, Minghe Sun, Jean-Louis Doucet, and Philippe Lejeune. 2012. Mathematical formulation and exact solution for landing location problem in tropical forest selective logging, a case study in Southeast Cameroon. *Journal of Forest Economics* 18, 2 (2012), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2011.11.002>
- [27] Marius J. Pohl, Lukas W. Lehnert, Boris Thies, Konstantin Seeger, Mônica B. Berdugo, S. Robbert Gradstein, Maaiké Y. Bader, and Jörg Bendix. 2023. Valleys are a potential refuge for the Amazon lowland forest in the face of increased risk of drought. *Communications Earth & Environment* 4, 1 (2023), 198. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00867-6>
- [28] Mauricio G.C. Resende and Renato F. Werneck. 2004. A Hybrid Heuristic for the p-Median Problem. *Journal of Heuristics* 10, 1 (2004), 59–88. <https://doi.org/10.1023/B:HEUR.0000019986.96257.50>
- [29] Júlio César Roma and André Luiz Campos de Andrade. 2013. Economia, concessões florestais e a exploração sustentável de madeira. (2013).
- [30] César Sabogal, Marco Lentini, Benno Pokorny, J Natalino M Silva, Johan Zweede, Adalberto Verissimo, and Marco Boscolo. 2006. *Manejo florestal empresarial na Amazônia Brasileira*. Cifor.
- [31] Andreia Santos, Ana Carvalho, Ana Paula Barbosa-Póvoa, Alexandra Marques, and Pedro Amorim. 2019. Assessment and optimization of sustainable forest wood supply chains – A systematic literature review. *Forest Policy and Economics* 105 (2019), 112–135. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.05.026>
- [32] Serviço Florestal Brasileiro. 2022. Florestas Naturais. <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/recursos-florestais/florestas-naturais>. <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/temas-florestais/recursos-florestais/florestas-naturais> Acesso em: 31 out. 2024.
- [33] SS Radiah Shariff, Noor Hasnah Moin, and Mohd Omar. 2012. Location allocation modeling for healthcare facility planning in Malaysia. *Computers & Industrial Engineering* 62, 4 (2012), 1000–1010.
- [34] Evandro Ferreira Silva, Gilson Fernandes da Silva, Evandro Figueiredo, Adriano Mendonça, Cesar Santana, Nilton Fiedler, Jeferson Silva, Marcelo Aguiar, and Jeangelis Santos. 2020. Optimized forest planning: allocation of log storage yards in the Amazonian sustainable forest management area. *Forest Ecology and Management* 472 (09 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118231>
- [35] Paulo Henrique da SILVA, Lucas Rezende GOMIDE, Evandro Orfanó FIGUEIREDO, Luis Marcelo Tavares de CARVALHO, and Antônio Carlos FERRAZ-FILHO. 2018. Optimal selective logging regime and log landing location models: a case study in the Amazon forest. *Acta Amazonica* 48, 1 (Jan 2018), 18–27. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201603113>
- [36] Lawrence V Snyder. 2006. Facility location under uncertainty: a review. *III transações* 38, 7 (2006), 547–564.