

Modelos de Otimização para Localização de Lockers de Última Milha

Gabriel Vinícius dos Santos

Maristela Oliveira dos Santos

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC), Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, CEP 13566-590, São Carlos - SP.

gabrielvs.mdo@gmail.com

mari@icmc.usp.br

Hellen Geremias Gatica Santos

Instituto Carlos Chagas, Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)

Rua Prof. Algacyr Munhoz Mader, 3775 - CIC, CEP 81350-010 Curitiba -PR.

hellen.santos@fiocruz.br

RESUMO

Este trabalho analisa modelos para a localização de lockers de última milha na cidade de São Paulo, com o objetivo de determinar os locais ideais que minimizem a distância entre lockers e potenciais clientes. São explorados modelos clássicos da literatura, incluindo Cobertura, Cobertura Máxima, p-Mediana e p-Centro. Nos testes computacionais, são utilizados dados públicos da cidade de São Paulo, como população, área e indicadores de criminalidade, para evitar alocação de lockers em regiões de alto risco. A análise é conduzida em duas fases: primeiro, otimizam-se os modelos de cobertura; posteriormente, incorporam-se restrições relacionadas à criminalidade, limitando a instalação dos lockers em áreas de alto risco. Além da criminalidade, a avaliação é feita com base nas métricas dos modelos: soma das distâncias, distância máxima e cobertura dos clientes. Dessa forma, o estudo contribui no debate sobre logística urbana ao representar uma rede de lockers que busca tanto eficiência quanto segurança.

PALAVRAS CHAVE. Localização de Facilidades, Logística Urbana, Locker de última Milha, E-commerce.

L&T - Logística e Transportes, OD - Otimização Discreta

ABSTRACT

This work analyzes models for the location of last-mile lockers in the city of São Paulo, with the objective of determining the ideal locations that minimize the distance between lockers and potential customers. Classic models in the literature are explored, such as Coverage, Maximum Coverage, p-Median, and p-Center. In the computer tests, public data from the city of São Paulo are used, including population, area and crime indicators, in order to avoid the allocation of lockers in high-risk regions. The analysis is conducted in two phases: first, the coverage models are optimized; subsequently, restrictions related to crime are incorporated, limiting the installation of lockers in high-risk areas. In addition to crime, the evaluation is based on the models' metrics: sum of distances, maximum distance, and customer coverage. Thus, the study contributes to the debate on urban logistics by representing a network of lockers that seeks both efficiency and security.

KEYWORDS. Facility Location, Urban Logistics, Last-Mile Parcel Locker, E-commerce.

L&T - Logistics and Transport, OD - Discrete Optimization

1. Introdução

Nos últimos anos, o mercado de e-commerce tem se expandido rapidamente, com o faturamento do e-commerce brasileiro crescendo 18,7% e alcançando R\$ 160,3 bilhões no primeiro semestre de 2024 [NielsenIQ, 2024]. Com o crescimento do e-commerce, os lockers ou armários inteligentes, que podem ser instalados em locais estratégicos de grandes cidades, representam uma solução que reduz processos e custos logísticos [Valor Econômico, 2025]. O estudo em Valor Econômico [2025] aponta para o crescimento dos lockers como unidades de armazenamento automatizadas e seguras para pacotes, encomendas e outros itens.

Na literatura revisada, diversos estudos abordam o problema da localização de lockers inteligentes, como o de Deutsch e Golany [2018], que propõe uma rede de armários para pacotes como solução para a última milha na logística. Os autores buscam determinar o número, as localizações e os tamanhos ideais das instalações, visando maximizar o lucro total, calculado a partir da receita dos clientes menos os custos fixos, operacionais e os descontos para clientes que se deslocam para retirar seus pacotes. O problema é formulado como um programa linear inteiro 0-1 e se assemelha ao Problema de Localização de Instalações sem capacidade, sendo sua versão modificada aplicada a uma rede de grande escala.

Estudos recentes reforçam a relevância dos lockers na otimização da logística de última milha. Em Iwan et al. [2016], um estudo de caso conduzido na Polônia destaca que a localização adequada dos lockers é o principal fator para a eficiência do sistema de entregas. De forma complementar, Pourmohammadreza et al. [2025] realizam uma revisão sistemática sobre estratégias alternativas de entrega, como lockers e serviços itinerantes, revelando que mais de 89% dos trabalhos foram publicados nos últimos seis anos. A análise indica uma busca crescente em soluções sustentáveis, com ênfase no uso de tecnologias como inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT). A revisão da literatura de Hashisaka Junior e Maccari [2023] tem como foco específico a aplicação de lockers, identificando impactos positivos em aspectos como mobilidade urbana, meio ambiente e desenvolvimento econômico. Por sua vez, Raviv e Gansterer [2025] apresentam uma revisão de abordagens computacionais, incluindo modelagem matemática, no contexto dos lockers.

No campo da otimização, diversos trabalhos serviram de base para o presente estudo. Em Da Silva e Mestria [2019], é proposto o Problema de Localização de Estações de Carregamento de Veículos Elétricos, buscando minimizar a distância entre os clientes e os pontos de instalação. Já Zhang et al. [2023] formulam o Problema de Localização e Alocação de Lockers de Entrega como um programa linear inteiro, com o objetivo de reduzir o número de lockers instalados e minimizar a alocação de entregadores e *crowd-shippers*, considerando uma segmentação por distritos. A proposta de Kahr [2022] incorpora a estrutura e capacidade ideal dos lockers ao processo de localização, utilizando um modelo inteiro misto combinado a uma reformulação baseada em decomposição de Benders, visando maximizar a demanda. Por fim, Ozyavas et al. [2025] modelam os lockers como pontos de coleta para consumidores e como centros de transferência para as empresas de entrega. O problema é estruturado como uma variante do Problema de Localização e Roteamento (LRP), com uma abordagem de duas camadas (*two-echelon*) e solução via algoritmos *branch-and-price*. Um estudo de caso real é apresentado para o bairro de Groningen, nos Países Baixos, comparando modelos de uma e duas camadas.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2, apresenta-se a descrição do problema. A Seção 3 trata da modelagem, onde são detalhados os diferentes modelos propostos, junto com parâmetros, variáveis, funções objetivo e restrições. A Seção 4 descreve a abordagem de duas fases adotada. Na Seção 5, são apresentados os testes computacionais realizados. A Seção 6 mostra os resultados obtidos. Por fim, a Seção 8 apresenta as conclusões finais deste trabalho.

2. Descrição do Problema

O problema em estudo consiste em determinar quais localizações de lockers de última milha devem ser adotadas no município de São Paulo, de modo a atender, da melhor forma possível, os potenciais clientes da cidade. Para modelar essa decisão, dois parâmetros principais foram considerados: a distância entre lockers e clientes, e a criminalidade da região onde os lockers serão instalados.

Para o primeiro parâmetro, foram utilizadas localizações geoespaciais tanto dos pontos candidatos à instalação dos lockers quanto dos clientes, possibilitando a construção de uma matriz de distâncias, em quilômetros, entre esses pontos. No que se refere à análise da criminalidade das regiões de instalação, foram utilizados dados dos 93 distritos policiais da cidade, como ocorrências de roubos e furtos e densidade demográfica. Esses dados foram combinados com a abordagem de modelagem adotada, resultando na definição de um parâmetro denominado *criminalidade*, que associa um valor a cada distrito policial, sendo este valor também associado ao locker caso seja instalado no distrito. Esse parâmetro é definido como:

$$\text{Criminalidade} = \frac{(\text{Roubos} + \text{Furtos})^2}{\text{Densidade Demográfica}} \quad (1)$$

Esse índice, dado em (1), quantifica o grau de exposição de um locker a áreas com maiores níveis de criminalidade. Os valores máximos e mínimos do parâmetro foram analisados em diferentes configurações de alocação. A Figura 1 apresenta um mapa de calor da cidade de São Paulo segmentada por Distritos Policiais, em que as cores mais escuras indicam regiões com níveis mais elevados de criminalidade.

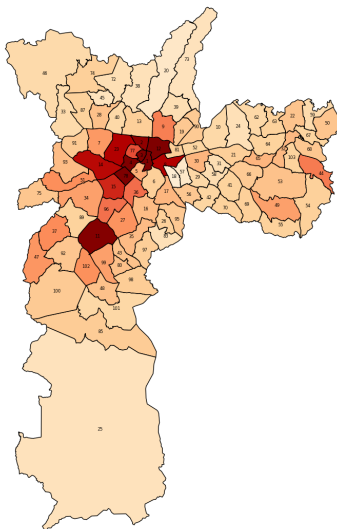


Figura 1: Mapa de calor da criminalidade por Distrito Policial da cidade de São Paulo

Além disso, consideraram-se a área de cobertura de um locker e o número total de lockers a serem instalados — parâmetros amplamente utilizados em problemas de localização de facilidades. Esses dois fatores foram variáveis no modelo, permitindo a análise de diferentes cenários e a busca por soluções adequadas ao problema. O objetivo, portanto, é encontrar o número ótimo de lockers e suas respectivas localizações, de modo a minimizar as distâncias totais, e garantir que as instalações não estejam concentradas em regiões com altos índices de criminalidade urbana.

3. Modelagem do Problema

Os modelos nesta seção abordam diferentes perspectivas do problema de localização de facilidades [Arenales et al., 2007]. Os dois primeiros modelos - cobertura e cobertura máxima [Church e Velle, 1974] - foram utilizados para realizar diversas análises em relação aos parâmetros de "criminalidade" e ao número de lockers. Por sua vez, os modelos p -mediana e p -centro foram empregados para obter as soluções finais e avaliar a qualidade das alocações geradas.

3.1. Conjuntos, Parâmetros e Variáveis

Para os diversos modelos apresentados neste trabalho, o conjunto I representa os locais candidatos à instalação dos lockers, enquanto J denota os pontos de demanda (clientes). O conjunto N_j contém, para cada cliente j , o conjunto de lockers localizados dentro de um raio S que o cobrem, sendo esse raio variado e analisado nos primeiros modelos. O conjunto K representa os distritos da cidade.

O parâmetro d_{ij} indica a distância entre o locker i e o cliente j , enquanto a_k representa a população associada à região k onde o cliente j está inserido. O parâmetro c_i corresponde à taxa de criminalidade na região do locker i . O valor de P define a quantidade total de lockers a serem instalados. Os valores de criminalidade mínimo e máximo, $C_{\min}$ e $C_{\max}$, determinados nas primeiras modelagens, são utilizados como referência nos modelos seguintes.

A variável binária x_{ij} indica se o cliente j é atendido pelo locker i . A variável binária y_i representa se o locker em i foi instalado. A variável binária z_j , utilizada nos modelos de cobertura, indica se o cliente j está coberto por algum locker dentro do raio S . Por fim, a variável contínua r representa a maior distância de atendimento entre cliente e locker.

Um resumo dos parâmetros e variáveis descritos é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Conjuntos, parâmetros e variáveis dos modelos de localização

Conjuntos	
I	Conjunto de locais candidatos à instalação dos lockers, $i \in I$.
J	Conjunto de locais dos clientes (pontos de demanda), $j \in J$.
N_j	Conjunto de lockers que cobrem o cliente j para um raio fixo S , $i \in I$.
K	Conjunto de clientes que representam regiões da cidade de São Paulo, $k \in K$.
Parâmetros	
d_{ij}	Distância entre o locker i e o cliente j .
a_k	População referente a região k .
a_j	População referente ao cliente j .
c_i	Taxa de criminalidade referente à instalação do locker i .
P	Número total de lockers a serem instalados.
S	Raio fixo de cobertura dos lockers.
$C_{\max}$	Criminalidade máxima considerada.
$C_{\min}$	Criminalidade mínima considerada.
Variáveis	
x_{ij}	1 se o cliente j é atendido pelo locker i , 0 caso contrário.
y_i	1 se o locker é instalado no local i , 0 caso contrário.
z_j	1 se o cliente j está coberto, 0 caso contrário.
r	Maior distância de atendimento entre cliente e locker.

3.2. Modelos Investigados

3.2.1. Cobertura

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in I} y_i \quad (2)$$

$$\text{Sujeito a } \sum_{i \in N_j} y_i \geq 1 \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (4)$$

A função objetivo (2) busca minimizar o número de lockers selecionados. A restrição (3) garante que cada cliente seja atendido por pelo menos um locker, ou seja, que haja ao menos um locker dentro de seu raio de cobertura. A restrição (4) define o domínio das variáveis. Todos os clientes são cobertos neste modelo. Modelo usado na Fase 1.

3.2.2. Cobertura minimizando a criminalidade

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in I} c_i \cdot y_i \quad (5)$$

A função objetivo (2) pode ser alterada para (5), de modo a encontrar a menor criminalidade ao instalar os lockers para atender os clientes dentro do seu raio de cobertura. As restrições (3) e (4) continuam sendo válidas. Modelo usado na Fase 1.

3.2.3. Cobertura Máxima de regiões

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{j \in J} a_j \cdot z_j \quad (6)$$

$$\text{Sujeito a } \sum_{i \in N_j} y_i \geq z_j \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = P \quad (8)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (10)$$

A função objetivo (6) busca maximizar a população coberta pelos lockers instalados, ponderando cada cliente por sua população a_j . A restrição (7) exige ao menos um locker na região para que o cliente seja coberto. A restrição (8) impõe que exatamente P lockers sejam instalados. As restrições (9)-(10) definem o domínio das variáveis. Para regiões, $a_j = a_k$ e $J = K$. Nem todos os clientes são cobertos neste modelo. Modelo usado na Fase 1.

3.2.4. Cobertura Máxima de pontos

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{j \in J} z_j \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} c_i \cdot y_i \leq \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \quad (12)$$

A função objetivo (6) pode ser alterada para (11) de modo a maximizar o número de clientes cobertos dentro do seu raio de cobertura. A restrição (12) define o limite da criminalidade dos lockers instalados. As restrições (7), (8), (9) e (10) continuam sendo válidas. Nem todos os clientes são cobertos neste modelo. Modelo usado na Fase 2.

3.2.5. P-Mediana

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (13)$$

$$\text{Sujeito a } \sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (14)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = P \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} c_i \cdot y_i \leq \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \quad (17)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad \forall j \in J \quad (18)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I \quad (19)$$

A função objetivo (13) minimiza a soma total das distâncias entre os clientes e os lockers que os atendem. A restrição (14) garante que cada cliente seja atendido por exatamente um locker. A restrição (15) assegura que um cliente só pode ser atribuído a um locker se este tiver sido instalado. A restrição (16) impõe que exatamente P lockers sejam instalados. A restrição (17) define o limite da criminalidade dos lockers instalados. As restrições (18)-(19) definem o domínio das variáveis. Modelo usado na Fase 2.

3.2.6. P-Centro

Pode-se alterar a função objetivo (13) do modelo anterior para (20), incluindo a variável r e as restrições (21) e (22), para obter agora o novo modelo. As restrições (14) a (19) do modelo anterior também são consideradas.

$$\text{Minimizar } Z = r + m \cdot \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} \cdot x_{ij} \quad (20)$$

$$\sum_{i \in I} d_{ij} \cdot x_{ij} \leq r \quad \forall j \in J \quad (21)$$

$$r \geq 0 \quad (22)$$

A função objetivo (20), junto com a restrição (21), busca minimizar a maior distância de atendimento r , somada a um termo penalizador proporcional à soma total das distâncias, ponderado por um fator m muito pequeno (por exemplo, 10^{-12} , como feito em Calixto et al. [2024]). Esse segundo termo atua como uma penalização adicional pela distância total percorrida, permitindo distinguir soluções que apresentam o mesmo valor de r , mas distribuições de atendimento distintas. A restrição (22) define o domínio da variável. Modelo usado na Fase 2.

4. Abordagem

Uma vez definidos os modelos, é possível apresentar o *pipeline* da abordagem adotada neste trabalho. A Figura 2 ilustra o fluxo geral da metodologia utilizada, dividida em duas fases principais.

Na Fase 1, são utilizados os modelos de cobertura (3.2.1), cobertura com minimização da criminalidade (3.2.2) e cobertura máxima (3.2.3) para realizar uma análise exploratória dos dados. Esses modelos auxiliam na definição de quatro parâmetros fundamentais: o raio de cobertura S ,

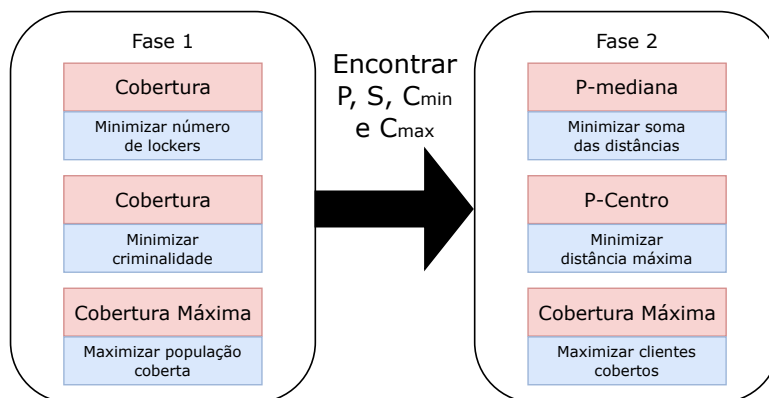


Figura 2: Pipeline da abordagem em 2 Fases

o número de lockers a serem abertos P , e os limites inferior e superior de criminalidade ($C_{\min}$ e $C_{\max}$). A partir dessa etapa, é possível entender melhor os trade-offs entre cobertura e segurança.

Na Fase 2, os parâmetros definidos anteriormente são incorporados aos modelos Cobertura Máxima (3.2.4), p -mediana (3.2.5) e p -centro (3.2.6), os quais são utilizados para gerar as soluções finais de alocação dos lockers. Desse modo, é possível encontrar configurações que minimizem a distância entre clientes e lockers, ao mesmo tempo em que respeitem limites de criminalidade estabelecidos.

5. Testes Computacionais

5.1. Base de Dados Utilizados

Para a aplicação apresentada neste trabalho, foi necessário reunir dados específicos da cidade de São Paulo, referentes ao ano de 2022. As três principais fontes utilizadas foram: a Secretaria da Segurança Pública do Estado de São Paulo [2025], que disponibiliza dados de roubo e furto referentes ao ano de 2022, além de diversas outras estatísticas relacionadas à violência na cidade; o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [2022], que, por meio do censo realizado em 2022, forneceu informações sobre a população e a densidade demográfica dos distritos de São Paulo; e a Prefeitura do Município de São Paulo [2025], que, por meio da plataforma GeoSampa, oferece o mapa digital da cidade em formato aberto, com divisões territoriais oficiais.

Além disso, foi realizada uma análise da cidade com o objetivo de identificar pontos adequados para a possível instalação dos lockers. Os principais locais considerados foram: farmácias, postos de gasolina e supermercados abertos 24 horas; e shoppings-metrô, que são centros comerciais localizados nas proximidades de estações de metrô ou da CPTM. Essas localidades foram escolhidas por apresentarem alto fluxo de pessoas e maior potencial de segurança, muitas vezes contando com câmeras de vigilância ou profissionais de segurança nas proximidades.

5.1.1. Dados de Teste e Instâncias

Com os diversos dados obtidos, foi possível definir os parâmetros utilizados em cada fase do modelo. Para os pontos candidatos à instalação dos lockers, foram selecionadas 59 localidades, conforme descrito na Seção 5.1.

Na Fase 1, são aplicados os modelos de cobertura, cobertura com minimização da criminalidade e cobertura máxima para realizar uma análise exploratória e determinar os valores adequados dos parâmetros S , P , $C_{\min}$ e $C_{\max}$. Essa análise é realizada com base nas regiões, que são os 93 distritos policiais da cidade de São Paulo, que formam o conjunto K . A Tabela 2 resume o processo de otimização da Fase 1.

Tabela 2: Fase 1 do processo de otimização

Parâmetro	Variação	Significado
S	$1, \dots, 35$	Varia-se até que o número de lockers instalados seja igual a 1
a_k	$k \in K, k = 1, \dots, 93$	Centróides dos distritos policiais, contendo a população de cada distrito

Na Fase 2, o objetivo é aplicar os modelos finais de otimização para definir as melhores posições dos lockers. Nessa etapa, foram testadas três instâncias distintas com 1000, 5000 e 10000 pontos de demanda, representando possíveis clientes distribuídos espacialmente pela cidade de São Paulo. Esses pontos foram gerados com maior concentração nas regiões de maior densidade demográfica, simulando a demanda real por lockers em regiões urbanas mais densamente povoadas. Além disso, os modelos da Fase 2 foram avaliados em dois cenários: com e sem a restrição de criminalidade. Essa comparação permite analisar o impacto da segurança na alocação final dos lockers. A tabela 3 resume o processo de otimização da Fase 2.

Tabela 3: Fase 2 do processo de otimização

Parâmetro	Análise 1	Análise 2	Significado
S	Fixo	Fixo	Raio de cobertura dos lockers
$C_{\min}$	Fixo	Ausente	Valor mínimo observado de criminalidade
$C_{\max}$	Fixo	Ausente	Limite máximo permitido de criminalidade
P	Fixo	Fixo	Número de lockers a serem alocados

5.2. Ambiente de Teste

Os testes foram feitos em um computador com sistema operacional *Windows 10*, processador *Intel Core i5-11400H* (2.70GHz) com 6 núcleos físicos, no máximo de 12 threads e 16.0 GB de memória RAM. Os modelos foram implementados em *Python*, utilizando o solver *Gurobi 12.0.1*, acessado via licença acadêmica.

6. Resultados

6.1. Fase 1

Na Fase 1, com o modelo de Cobertura Máxima (3.2.3), variou-se P e S , permitindo a geração de um mapa de calor que representa o desempenho das coberturas obtidas. A Figura 3 mostra que os valores mínimos necessários para atingir uma cobertura de 100% da população são $S = 9$ e $P = 7$. Foi estabelecido um tempo limite de 15 minutos para a resolução dos modelos, e todos obtiveram solução ótima dentro desse intervalo. Detalhes sobre os *gap%* e *runtime* (s) estão na Tabela 5.

Os modelos de Cobertura que visam minimizar o número de lockers (3.2.1) e a criminalidade (3.2.2) foram aplicados para identificar os limites inferior e superior de criminalidade aceitáveis, os quais serão incorporados como restrições na Fase 2. Com os resultados apresentados na Tabela 4, torna-se possível avançar para os modelos de otimização da Fase 2.

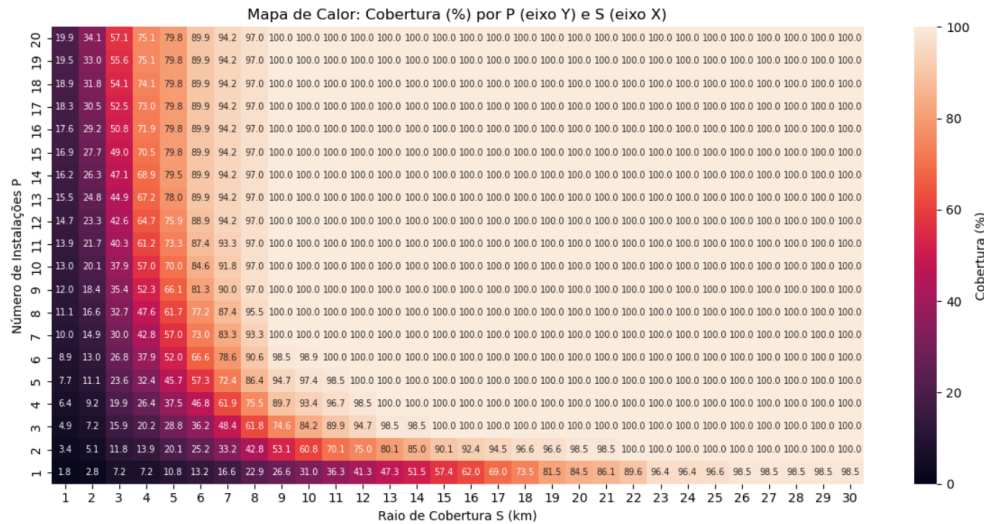


Figura 3: Cobertura máxima

Tabela 4: Valores fixos de criminalidade encontrados na Fase 1

Modelo	Função Obj.	Instância	Var. Obtida	Runtime (s)	gap %
Cobertura Máxima	$a\%$	93 DPs	$P = 7$ para $S = 9$	0,03	0,00
Cobertura	P	93 DPs	$C_{max} = 6,553$	0,01	0,00
Cobertura	Criminalidade	93 DPs	$C_{min} = 1,061$	0,05	0,00

6.2. Fase 2

Como mencionado na Seção 5, os dados de teste utilizados na Fase 2 consistem em 3 instâncias de 1000, 5000 e 10000 pontos de demanda distribuídos na região de São Paulo, com maior concentração nas áreas de maior densidade demográfica, de forma a representar a demanda real por lockers em zonas urbanas mais habitadas. Todos os modelos obtiveram solução ótima dentro do tempo limite de 15 minutos estabelecido para a resolução. Detalhes sobre os $gap\%$ e $runtime$ (s) estão nas Tabelas 5 e 6. Inicialmente, são apresentados os resultados sem a consideração das restrições de criminalidade por meio da Figura 4. Da esquerda para a direita, temos os modelos p -mediana, p -centro e Cobertura Máxima. A Tabela 5 apresenta os resultados das variáveis de decisão e o total de criminalidade associada às instalações.

Em seguida, os modelos são executados considerando a restrição de criminalidade. A Figura 5 apresenta as novas alocações de lockers obtidas, enquanto a Tabela 6 resume os resultados das variáveis, incluindo o total de criminalidade associada em cada caso.

A comparação entre os dois cenários permite avaliar o impacto da segurança na qualidade das soluções geradas. Na Figura 4, observa-se que os três modelos apresentam alocações semelhantes em termos de distribuição geográfica. No entanto, como ilustrado na Figura 5, a introdução da restrição de criminalidade resultou em configurações mais dispersas e diferenciadas entre os modelos, refletindo a necessidade de evitar regiões com altos índices de risco. Comparando os dois cenários, observou-se um aumento nas variáveis de decisão acompanhado por uma redução na criminalidade total para algumas instâncias. Esses resultados indicam que, apesar do impacto relativamente baixo na eficiência das soluções, a imposição da restrição de criminalidade contribui para alocações mais seguras, sem comprometer de forma relevante a qualidade geral da solução.

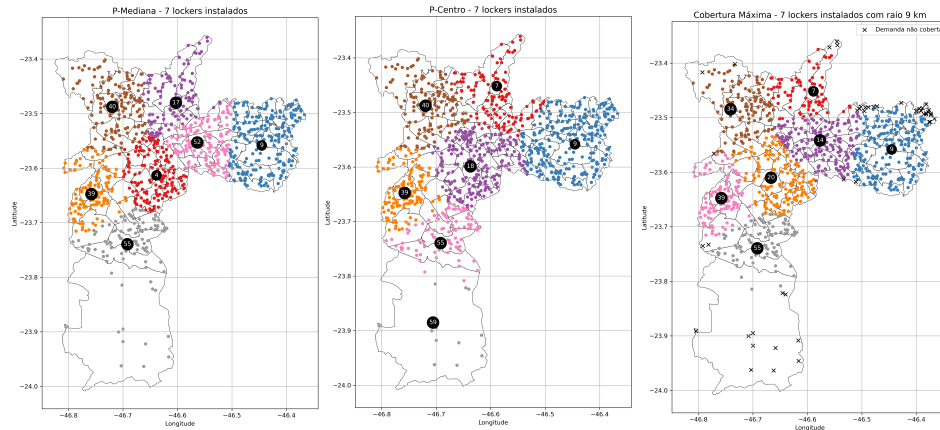


Figura 4: Resultados da Fase 2 para $S=9$, $P=7$ e 1000 clientes sem restrição de criminalidade

Tabela 5: Resultados dos modelos (sem restrição de criminalidade)

Modelo	Instância	Var. Obj.	C_{TOTAL}	Runtime (s)	gap %
p -mediana	1000 clientes	$\sum d = 5.295,26$	2,875	2,0	0,00
p -centro	1000 clientes	$r = 11,34$	7,493	2,9	0,00
Cobertura máxima	1000 clientes	$a\% = 95,39\%$	7,493	0,0	0,00
p -mediana	5000 clientes	$\sum d = 26.229,8$	2,875	23,0	0,00
p -centro	5000 clientes	$r = 12,39$	7,215	246,4	0,00
Cobertura máxima	5000 clientes	$a\% = 95,11\%$	3,186	0,2	0,00
p -mediana	10000 clientes	$\sum d = 52.703,6$	2,875	55,4	0,00
p -centro	10000 clientes	$r = 13,47$	6,622	829,0	0,00
Cobertura máxima	10000 clientes	$a\% = 95,37\%$	3,372	0,1	0,00

7. Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder o dom da vida e pela oportunidade de concluir este artigo. Expresso meu profundo amor e gratidão a toda a minha família. Agradeço, em especial, à minha orientadora, Prof.^a Dra. Maristela Oliveira dos Santos, e à Prof.^a Dra. Hellen Gernias Gatica Santos, cujo apoio e orientação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Também agradeço ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação e à Universidade de São Paulo pelo suporte e infraestrutura. Por fim, registro meus agradecimentos aos apoiadores deste trabalho: à FAPESP (processos nº 13/07375-0, 22/05803-3 e 24/08485-8) e ao CNPq (Processos 307466/2021-3).

8. Conclusão

Ao explorar diferentes modelos de otimização para a localização de facilidades, este trabalho abordou o problema sob duas perspectivas complementares: a minimização das distâncias entre lockers e usuários, e a consideração de restrições relacionadas à criminalidade, no contexto urbano da cidade de São Paulo. Na Fase 1, foram definidos os parâmetros e avaliados os modelos de cobertura. Na Fase 2, foram apresentados os mapas com as localizações selecionadas para instalação dos lockers, além da análise dos resultados obtidos para os diferentes modelos propostos. Observou-se uma convergência entre as soluções, com uma configuração considerada ideal, que evita tanto regiões centrais quanto periféricas, consideradas áreas com maiores índices de criminalidade.

Como perspectivas futuras, sugere-se a inclusão de restrições de capacidade, bem como a flexibilização do número de lockers a serem instalados. Adicionalmente, a aplicação de heurísticas

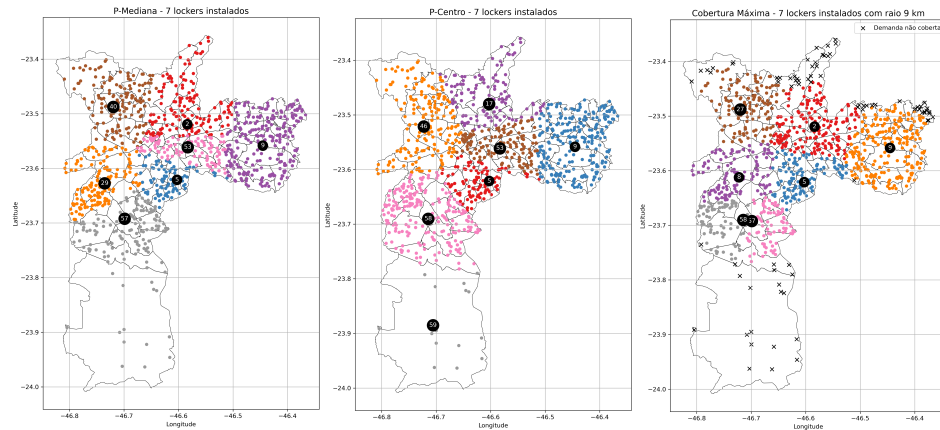


Figura 5: Resultados da Fase 2 para $S=9$, $P=7$ e 1000 clientes com restrição de criminalidade

Tabela 6: Resultados dos modelos com restrição de criminalidade para diferentes tamanhos de instância

Modelo	Instância	Var. Obj.	C_{TOTAL}	Runtime (s)	gap %
p -mediana	1000 clientes	$\sum d = 5.295,26$	2,875	2,1	0,00
p -centro	1000 clientes	$r = 21,69$	2,85	2,3	0,00
Cobertura máxima	1000 clientes	$a\% = 95,39\%$	3,372	0,0	0,00
p -mediana	5000 clientes	$\sum d = 26.229,8$	2,875	22,7	0,00
p -centro	5000 clientes	$r = 23,78$	2,730	36,2	0,00
Cobertura máxima	5000 clientes	$a\% = 95,11\%$	3,186	0,1	0,00
p -mediana	10000 clientes	$\sum d = 52.703,6$	2,875	57,2	0,00
p -centro	10000 clientes	$r = 25,12$	2,800	52,5	0,00
Cobertura máxima	10000 clientes	$a\% = 95,37\%$	3,372	0,1	0,00

de perturbação pode contribuir para a melhoria das soluções em relação aos critérios de segurança e eficiência logística. Por fim, a abordagem multi-objetivo representa uma direção promissora para integrar e equilibrar diferentes objetivos do sistema de entrega urbana.

Referências

- Arenales, Armentano, V., Morabito, R., e Yanasse, H. (2007). *Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia*. Elsevier Brasil. ISBN 9788535251937.
- Calixto, J. B., Borges, P. P., e de Souza Pessoa, L. (2024). Modelos de localização para avaliação e proposição de casas de convivência para idosos no rio de janeiro. In *Anais do LVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Fortaleza. Galoá.
- Church, R. e Velle, C. R. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in regional science*, 32(1):101–118.
- Da Silva, Y. S. e Mestria, M. (2019). Algoritmos para o problema de localização de estações de carregamento de veículos elétricos. *Revista Produção Online*, 19(1):290–320.
- Deutsch, Y. e Golany, B. (2018). A parcel locker network as a solution to the logistics last mile problem. *International Journal of Production Research*, 56(1-2):251–261.

- Hashisaka Junior, C. e Maccari, E. A. (2023). Entendendo o negócio de entrega em lockers na última milha a partir de uma revisão sistemática de literatura: Understanding the last mile locker delivery business from a systematic literature review; comprender el negocio de entrega de casilleros de última milla a partir de una revisión sistemática de la literatura. *Revista Gestão & Tecnologia*, p. 2177–6652.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022). Censo demográfico 2022: Agregados por setores censitários. https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2022/Agregados_por_Setores_Censitarios/.
- Iwan, S., Kijewska, K., e Lemke, J. (2016). Analysis of parcel lockers' efficiency as the last mile delivery solution – the results of the research in poland. *Transportation Research Procedia*, 12: 644–655. ISSN 2352-1465. Tenth International Conference on City Logistics 17-19 June 2015, Tenerife, Spain.
- Kahr, M. (2022). Determining locations and layouts for parcel lockers to support supply chain viability at the last mile. *Omega*, 113:102721. ISSN 0305-0483.
- NielsenIQ (2024). A retomada da força do crescimento do e-commerce brasileiro. <https://nielseniq.com/global/pt/insights/education/2024/a-retomada-da-forca-do-crescimento-do-ecommerce-brasileiro/>.
- Ozyavas, P., Buijs, P., Ursavas, E., e Teunter, R. (2025). Designing a sustainable delivery network with parcel locker systems as collection and transfer points. *Omega*, 131:103199. ISSN 0305-0483.
- Pourmohammadreza, N., Jokar, M. R. A., e Van Woensel, T. (2025). Last-mile logistics with alternative delivery locations: A systematic literature review. *Results in Engineering*, 25:104085. ISSN 2590-1230.
- Prefeitura do Município de São Paulo (2025). Geosampa – plataforma de metadados geoespaciais. <https://metadados.geosampa.prefeitura.sp.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search>.
- Raviv, T. e Gansterer, M. (2025). Location, capacity, and layout problems of automated parcel lockers. In *Reference Module in Social Sciences*. Elsevier. ISBN 978-0-443-15785-1.
- Secretaria da Segurança Pública do Estado de São Paulo (2025). Estatísticas de criminalidade – dados mensais por distrito policial. <https://www.ssp.sp.gov.br/estatistica/dados-mensais>.
- Valor Econômico (2025). Mercado de lockers inteligentes projeta crescimento até 2032. <https://valor.globo.com/patrocinado/dino/noticia/2025/02/27/mercado-de-lockers-inteligentes-projeta-crescimento-ate-2032.ghtml>.
- Zhang, S., Le, T. V., e Roorda, M. (2023). Optimizing parcel locker locations in a city crowd logistics network. *Transportation Research Record*, 2677(12):267–283.