

Otimização da Localização de Unidades Básicas de Saúde em Sabará-MG via P-Mediana Capacitada

Ana Luiza de Oliveira Gouvêa

Bruno Nonato Gomes

Carlos Alexandre Silva

IFMG – Campus Sabará

Rodovia MGC 262, s/n, km 10, Bairro Sobradinho, CEP 34590-390, Sabará, MG, Brasil

analuiza.ogouvea@gmail.com, bruno.nonato@ifmg.edu.br,

carlos.silva@ifmg.edu.br

RESUMO

Este trabalho analisou a distribuição espacial das Unidades Básicas de Saúde (UBS) em Sabará-MG, utilizando o modelo de P-Mediana para otimizar a localização de novas unidades. O conjunto de dados compreendeu 18 UBS existentes e a malha de setores censitários do município, incluindo coordenadas geográficas e o número de Equipes de Saúde da Família (eSF) por unidade. O objetivo foi identificar locais candidatos para expansão da rede, respeitando a capacidade atual das unidades e minimizando a distância total entre os setores de demanda e os centros de saúde. Os modelos clássico e capacitado do problema de P-mediana foram implementados no IBM ILOG CPLEX. Os resultados evidenciam que a inclusão de restrições de capacidade aumenta o deslocamento médio, mas gera uma solução mais aderente à realidade operacional, indicando áreas prioritárias para implantação de novas unidades ou ampliação de equipes.

PALAVRAS CHAVE. P-mediana; Localização de facilidades; Atenção primária à saúde.

Tópicos: SA – PO na Área de Saúde; OD – Otimização Discreta.

ABSTRACT

This study analyzed the spatial distribution of Primary Health Care Units (UBS) in Sabará-MG, Brazil, using the P-Median model to optimize the location of new facilities. The dataset comprised 18 existing UBS and the municipality's census tract grid, including geographic coordinates and the number of Family Health Teams (eSF) per unit. The objective was to identify candidate locations for network expansion, respecting the current capacity of the units and minimizing the total distance between demand sectors and health centers. The classical and capacitated models were implemented in IBM ILOG CPLEX. The results show that the inclusion of capacity constraints increases the average distance, but produces a solution more consistent with operational reality, indicating priority areas for the implementation of new facilities or the expansion of health teams.

KEYWORDS. P-median; Facility location; Primary health care

Paper topics: SA – OR in Health; OD – Discrete Optimization.

1. Introdução

As Unidades Básicas de Saúde (UBS), popularmente conhecidas como postos de saúde, constituem centros de atenção primária e são responsáveis pelo atendimento inicial da população. Essas unidades desempenham papel fundamental no Sistema Único de Saúde (SUS), sendo consideradas uma das principais portas de entrada para os serviços de saúde, por oferecerem atendimento básico, acompanhamento preventivo e encaminhamento para outros níveis de atenção quando necessário [Brasil, 2025].

No contexto da atenção primária, as UBS contribuem para reduzir a sobrecarga de outros serviços de saúde ao absorver demandas não urgentes, como consultas de rotina, exames preventivos e acompanhamento de condições crônicas. Nesse sentido, a adequada localização dessas unidades torna-se essencial para assegurar o acesso da população, reduzir deslocamentos e melhorar a qualidade do atendimento prestado.

De acordo com a Constituição Federal de 1988, em seu artigo 196, a saúde é direito de todos e dever do Estado, devendo ser garantida por meio de políticas sociais e econômicas que assegurem acesso universal e igualitário aos serviços de saúde [Brasil, 1988]. No entanto, o crescimento populacional e a urbanização acelerada representam desafios significativos para o planejamento urbano. Segundo IBGE [2024], aproximadamente 87% da população brasileira reside em áreas urbanas, sendo o país marcado por elevados níveis de desigualdade, o que contribui para a expansão desordenada das cidades e para a distribuição inadequada de serviços públicos.

Dessa forma, torna-se necessário avaliar a distribuição espacial das Unidades Básicas de Saúde, a fim de verificar se sua localização é compatível com a demanda populacional e com as características territoriais de cada região. Essa análise é especialmente relevante em municípios com áreas urbanas concentradas e distritos mais afastados, nos quais a distância até os serviços de saúde pode acentuar desigualdades de acesso.

No âmbito do planejamento urbano, Dreux [2004] destaca a importância de critérios urbanísticos, como densidade demográfica e uso do solo, para a distribuição planejada de equipamentos e serviços urbanos. Segundo a autora, esses elementos devem ser organizados de modo a manter distâncias apropriadas entre áreas de habitação, trabalho e acesso a serviços essenciais, como os de saúde.

Diante desse cenário, observa-se que o município de Sabará-MG possui um total de 18 Unidades Básicas de Saúde, que compreendem a 34 eSF, as quais não se encontram distribuídas de maneira uniforme no território. Além disso, considerando a restrição de atendimento máximo de 3.000 pessoas por equipe, verifica-se que a capacidade instalada é insuficiente para atender toda a população do município, que totaliza 127.809 habitantes. Assim sendo, este trabalho tem como objetivo analisar a distribuição atual dessas unidades e propor uma modelagem de localização baseada em P-Mediana, em suas versões clássica e capacitada, que permita identificar posições mais estratégicas para a implantação de novas UBS ou ampliação de equipes, visando melhorar a cobertura e o acesso da população aos serviços de saúde.

2. Trabalhos Relacionados

A literatura relacionada à localização de facilidades em saúde pública tem explorado, ao longo dos anos, diferentes abordagens para avaliar a adequação espacial de serviços públicos e apoiar decisões de expansão, realocação e dimensionamento de unidades de atendimento. Uma revisão ampla dessa literatura é apresentada por Ahmadi-Javid et al. [2017], que classifica problemas de localização de facilidades em saúde em serviços emergenciais e não emergenciais. Nesse contexto, modelos clássicos como P-Mediana, P-Centro e Máxima Cobertura são frequentemente utilizados para representar diferentes objetivos de planejamento, como a redução de distâncias médias, a minimização da maior distância de atendimento e a maximização da população coberta dentro de um limite de deslocamento.

Dentro desse contexto, Goudard et al. [2015] analisaram a distribuição espacial de Unidades Básicas de Saúde em Joinville-SC, avaliando a localização das unidades existentes e propondo locais para implantação de novas UBS. O estudo considerou a desigualdade entre a distribuição atual das unidades e a demanda populacional, incorporando variáveis socioeconômicas, como renda e densidade populacional. Para isso, foram utilizados modelos clássicos da Pesquisa Operacional, como P-Mediana e Máxima Cobertura, com apoio de recursos de geoprocessamento e do solver CPLEX.

De forma semelhante, Calixto et al. [2024] investigaram a infraestrutura de atendimento a idosos na cidade do Rio de Janeiro, com foco nas Casas de Convivência. O problema central analisado consistiu em avaliar se a distribuição atual dessas facilidades era suficiente para atender à demanda crescente da população idosa, identificando também áreas potencialmente desassistidas. Nesse trabalho, foram utilizados os modelos P-Mediana e P-Centro para identificar diferentes cenários de localização e propor soluções otimizadas para a expansão das facilidades. Os resultados demonstraram que a implantação de novas unidades em regiões estratégicas poderia reduzir significativamente as distâncias médias de deslocamento e aumentar a acessibilidade dos idosos aos serviços oferecidos.

Na pesquisa de Costa et al. [2025], foram aplicadas técnicas de otimização com a finalidade de aumentar a eficiência da distribuição de medicamentos essenciais em Unidades Básicas de Saúde. Embora o foco do estudo esteja na logística de distribuição, a pesquisa evidencia a importância da Pesquisa Operacional para apoiar decisões relacionadas a rotas, processos e alocação de recursos na gestão pública de saúde.

Diante disso, modelos de otimização como P-Mediana, P-Centro e Máxima Cobertura são amplamente utilizados em problemas de localização de facilidades. O problema da mediana em redes tem origem clássica em Hakimi [1964] e foi posteriormente sistematizado em diferentes formulações de localização discreta [Daskin, 2013]. O modelo de P-Mediana busca localizar p facilidades minimizando a soma das distâncias, usualmente ponderadas pela demanda, entre cada ponto de demanda e a facilidade à qual ele é alocado. Já o modelo de P-Centro tem como objetivo minimizar a maior distância entre um ponto de demanda e a facilidade mais próxima, enquanto o modelo de Máxima Cobertura visa maximizar a demanda atendida dentro de uma distância limite predefinida. Esses modelos permitem avaliar diferentes critérios de eficiência e cobertura, sendo úteis em problemas de planejamento territorial de serviços públicos, como a distribuição de UBS em um município.

3. Metodologia

A pesquisa foi estruturada em três etapas principais: coleta e pré-processamento de dados, análise espacial e formulação dos modelos de localização. Inicialmente, foram organizadas as informações referentes às UBS existentes, aos setores censitários e às capacidades de atendimento. Em seguida, foram elaboradas representações cartográficas para caracterizar a distribuição atual das unidades e da demanda populacional. Por fim, foram comparadas duas formulações baseadas em P-Mediana, uma clássica e outra capacitada, visando identificar locais candidatos à expansão da rede de atenção básica em Sabará-MG.

3.1. Coleta e pré-processamento de dados

As informações coletadas abrangeram a localização das Unidades Básicas de Saúde presentes no município, a população de cada setor censitário e a quantidade de equipes de saúde atualmente vinculadas às unidades.

Os dados relacionados à quantidade de atendimentos foram coletados no Sistema de Informação em Saúde para a Atenção Básica (SISAB), referentes ao mês de abril de 2025, versão Q1 (descontinuada). Embora não seja a versão mais atual, foi a última disponível para consulta

no momento da pesquisa. Os dados referentes à localização geográfica das UBS foram obtidos no Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES). Além disso, parte desses dados iniciais foram validados e obtidos por meio de uma parceria estabelecida com a Secretaria Municipal de Saúde de Sabará, por meio da qual foram realizadas reuniões que possibilitaram o acesso a dados mais detalhados.

Após a coleta dos dados, foi elaborada uma planilha em Excel contendo as informações de cada UBS, associando cada unidade à sua localização, população de referência, regional administrativa, capacidade de atendimento e coordenadas geográficas (latitude e longitude), obtidas por meio do Google Maps.

Para a base territorial do município, foram utilizados dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), incluindo a malha dos setores censitários, a população associada a cada setor e a base cartográfica necessária à construção das representações espaciais.

3.2. Análise e reprodução dos mapas

A partir da etapa de coleta e tratamento dos dados, procedeu-se à construção de representações geográficas das Unidades Básicas de Saúde (UBS), com o objetivo de analisar sua distribuição espacial atual no município de Sabará. Para isso, utilizou-se a linguagem de programação Python, em conjunto com a biblioteca *folium*, que permite a criação de mapas interativos.

Inicialmente, foi calculado o ponto central do mapa a partir da média das coordenadas geográficas (latitude e longitude) de todas as UBS consideradas no estudo, possibilitando uma visualização mais equilibrada da região analisada. Em seguida, realizou-se a delimitação territorial do município por meio da utilização da malha geográfica obtida de forma prévia por meio do IBGE, a qual foi inserida ao mapa utilizando recursos de *GeoJSON*.

Além disso, com base na informação das regionais às quais cada UBS pertence, foi possível realizar a diferenciação visual das unidades por meio da atribuição de cores distintas. Essa estratégia permitiu uma melhor compreensão da organização territorial e da distribuição das UBS entre as regionais administrativas do município.

A Figura 1 ilustra a distribuição atual das UBS em Sabará-MG, diferenciadas por cores de acordo com suas respectivas regionais.

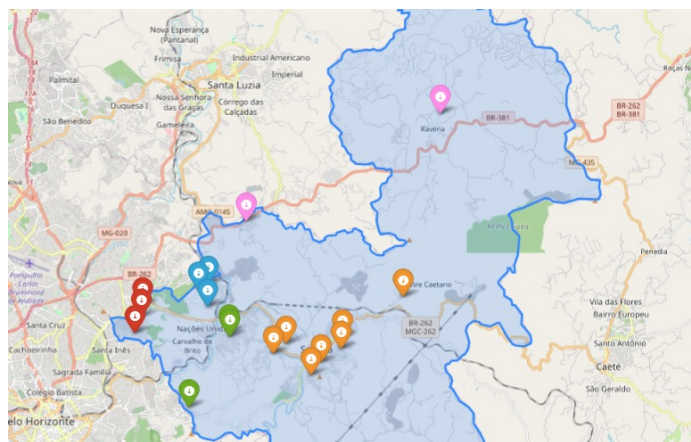


Figura 1: Distribuição atual das Unidades Básicas de Saúde

As UBS encontram-se distribuídas em cinco regionais administrativas no município de Sabará-MG: Alvorada, Fátima e General Carneiro, com três unidades cada; Centro, com sete unidades; e Ravena, com duas unidades. Cada regional foi representada por uma cor distinta no mapa, com o intuito de facilitar a identificação visual e a análise espacial da distribuição das unidades.

Para complementar as visualizações espaciais, utilizou-se o boxplot para analisar a distribuição da demanda entre as UBS, com base nos dados de atendimento extraídos do SISAB. Essa ferramenta permitiu identificar a variabilidade dos atendimentos, a presença de valores extremos (*outliers*) e assimetrias na distribuição da carga de trabalho entre as unidades. Os resultados indicaram que parte das UBS atuais opera com sobrecarga em relação à sua capacidade, reforçando a necessidade de uma redistribuição baseada em modelos de otimização e na adição de mais UBS e equipes de saúde família.

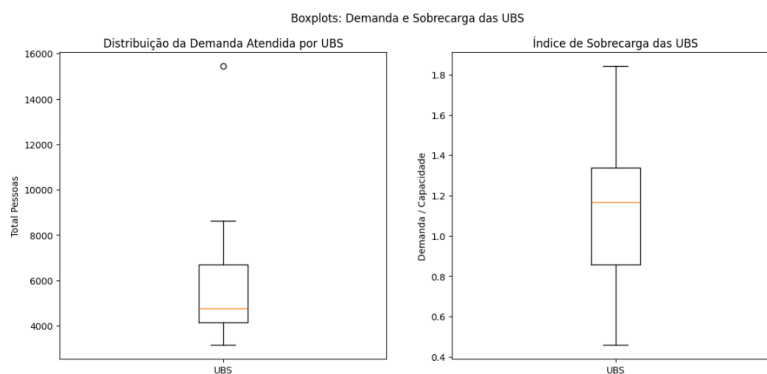
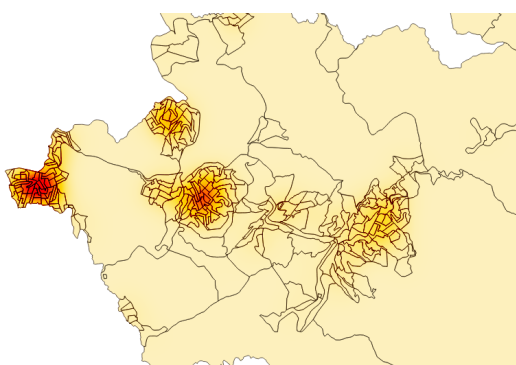
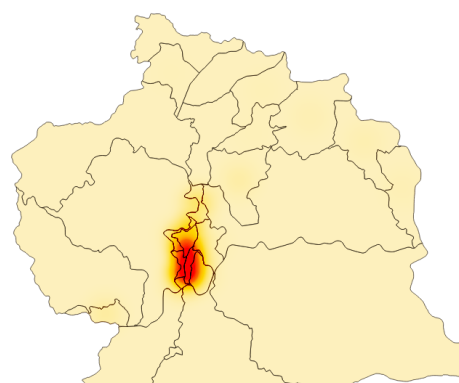


Figura 2: Distribuição da demanda populacional por UBS (Capacidade vs. Atendimento Real)

Além da representação obtida por meio da biblioteca *folium*, foram realizadas análises complementares utilizando o software QGIS. Nesse contexto, elaborou-se um mapa de calor com base na população dos setores censitários, apresentado na Figura 3, visando representar a concentração populacional no município. Essa abordagem permitiu identificar regiões com maior densidade populacional, fornecendo subsídios para a análise da distribuição das UBS.



(a) Mapa de calor centro e divisa com Belo Horizonte



(b) Mapa de calor regional Ravena

Figura 3: Mapa de calor baseado nos setores censitários

Adicionalmente, foi gerado um mapa a partir dos centroides de cada setor censitário, posteriormente utilizados como pontos de demanda e como locais candidatos à instalação de UBS na modelagem matemática. Para essa representação, foram considerados apenas os setores com população superior a zero, garantindo maior relevância na representação da demanda. A Figura 4 evidencia maior concentração de setores censitários na região mais à esquerda do mapa, onde Sabará faz divisa com Belo Horizonte, conforme indicado na Figura 1.

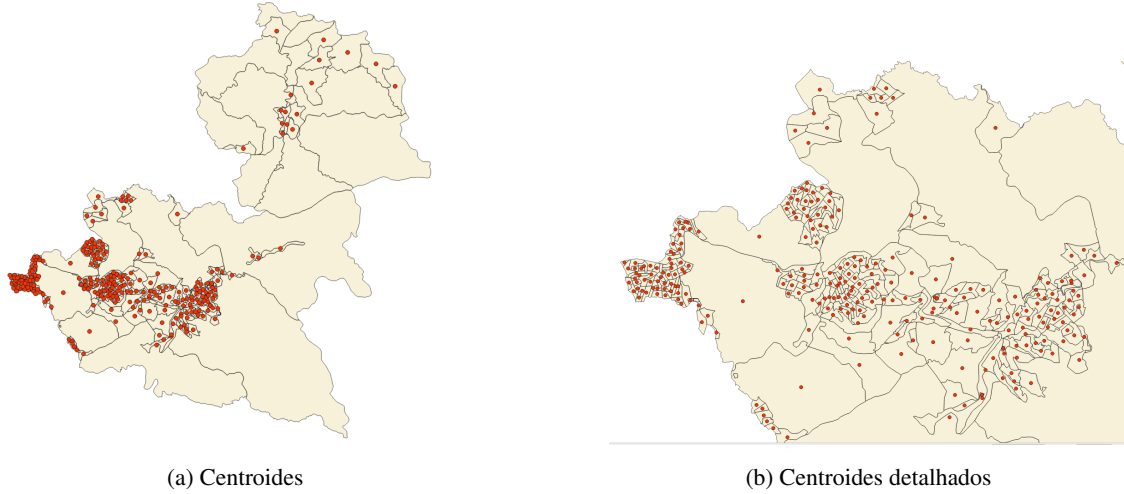


Figura 4: Centroides dos setores censitários

3.3. Desenvolvimento dos modelos

Com base nos dados coletados e na análise espacial dos centroides dos setores censitários, utilizou-se programação linear inteira para modelar a localização de centros de atendimento associados às UBS. O modelo adotado foi baseado no P-Mediana, implementado no software de otimização IBM ILOG CPLEX, sob duas abordagens distintas. A primeira, em sua forma clássica, buscou minimizar a distância total ponderada pela demanda. A segunda incorporou restrições de capacidade e a permanência das UBS existentes. As Tabelas 1 e 2 apresentam a notação utilizada nos modelos, detalhando os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão.

Símbolo	Descrição
I	Conjunto de locais candidatos a centros ($i \in \{1, \dots, 291\}$)
J	Conjunto de pontos de demanda ($j \in \{1, \dots, 291\}$)

Tabela 1: Conjuntos e Índices dos Modelos de Otimização

Tipo	Símbolo	Descrição
Parâmetros	c_{ij}	Distância entre o local candidato i e o ponto de demanda j
	d_j	Demanda populacional do ponto j
	K_i	Capacidade máxima de atendimento da unidade i
	p	Quantidade de centros a serem instalados
	$fixo_i$	Parâmetro binário que indica UBS existentes (1 se existente, 0 caso contrário).
Variáveis	y_i	Variável binária: 1 se o centro i for aberto/utilizado; 0 caso contrário
	x_{ij}	Variável binária: 1 se o ponto j for atendido pelo centro i ; 0 caso contrário

Tabela 2: Notação Unificada: Parâmetros e Variáveis (P-Mediana Clássica e Capacitada)

O modelo de P-Mediana clássico é formulado da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_j \cdot c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (1a)$$

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

$$x_{ij} \leq y_i, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (1c)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (1d)$$

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

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

Nesta formulação, a função objetivo (1a) minimiza o custo total de deslocamento. A restrição (1b) garante que cada ponto de demanda j , seja atendido por exatamente um centro. A restrição (1c) garante que a alocação ocorra apenas em unidades efetivamente abertas pelo modelo. A restrição (1d) define o número exato de facilidades p a serem consideradas. Por fim, as restrições (1e) e (1f) estabelecem a natureza binária das variáveis de decisão.

Já o modelo de P-Mediana com restrição de capacidade e manutenção das unidades já existentes é formulado da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_j \cdot c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2a)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in J \quad (2b)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2c)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \cdot x_{ij} \leq K_i \cdot y_i, \quad \forall i \in I \quad (2d)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (2e)$$

$$y_i \geq fixo_i, \quad \forall i \in I \quad (2f)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I \quad (2g)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2h)$$

No modelo capacitado, a função objetivo (2a) mantém a minimização da distância total ponderada pela demanda. A restrição (2b) garante que cada ponto de demanda seja atendido por exatamente uma unidade, enquanto a restrição (2c) impede alocações em unidades que não foram abertas. A restrição (2d) assegura que a demanda total alocada a uma UBS não exceda sua capacidade de atendimento. A restrição (2e) define o número total de centros/equipes considerados no cenário, e a restrição (2f) garante a permanência das UBS já existentes. Por fim, a restrição (2g) e a (2h) estabelecem a natureza binária das variáveis de decisão.

4. Resultados e discussão

4.1. Análise espacial das soluções

De acordo com os dados obtidos para cada setor censitário, por meio do IBGE, a população total considerada no estudo é de 127.809 habitantes. Além disso, para as possíveis novas

instalações definiu-se a capacidade em 3.000 pessoas por Equipe de Saúde da Família (eSF), valor compatível com a faixa recomendada pela Política Nacional de Atenção Básica [Brasil, 2017]. Dessa forma, cada nova unidade considerada no modelo corresponde à implementação de uma eSF, configuração que pode ser facilmente adaptada conforme as diretrizes das políticas públicas ou necessidades específicas do município.

Ao aplicar a modelagem clássica da P-Mediana, buscou-se simular um cenário hipotético de construção da rede do zero, utilizando $p=34$ (equivalente ao número total de equipes atuais). Os resultados, apresentados na Figura 5, demonstram que, apesar da minimização da soma das distâncias, a ausência de restrição de capacidade gera uma alocação desequilibrada.

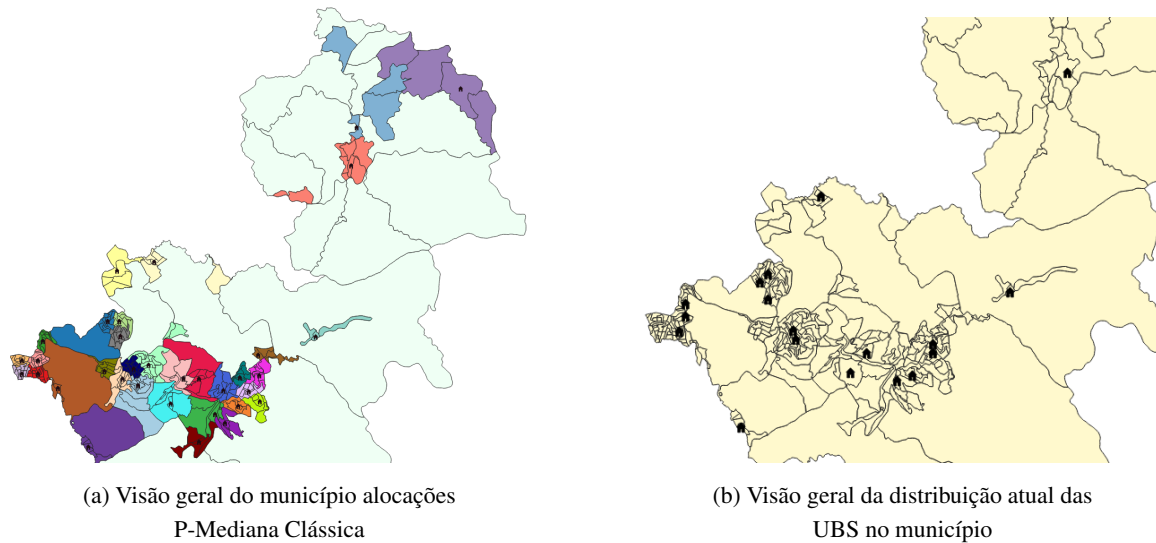


Figura 5: Solução P-Mediana Clássica com alocações sem considerar capacidade

Nesse cenário, observa-se que diversas unidades ultrapassaram severamente o limite de 3.000 pessoas por equipe, enquanto outras apresentaram volumes de atendimento baixo, conforme pode ser observado na Tabela 3. Esse comportamento confirma que uma otimização considerando apenas a geografia é insuficiente para garantir a equidade no acesso à saúde. O modelo clássico tende a priorizar regiões de maior concentração de demanda, o que resulta na redução da cobertura territorial e na desassistência de áreas periféricas ou menos densas. Na Figura 5, é possível observar que as unidades abertas (representadas pelos ícones de casas) são alocadas em locais com maior demanda demográfica, como mostrado no mapa de calor da Figura 3.

Inicialmente, foi realizada uma estimativa da quantidade de equipes necessárias para atender toda a população do município. Considerando uma população total de 127.809 habitantes e a capacidade média de atendimento de 3.000 pessoas por equipe, obtém-se:

$$\frac{127.809}{3000} \approx 42,6 \approx 43 \text{ equipes} \quad (3)$$

Atualmente, o sistema consta com 34 equipes, o que indica a necessidade de aproximadamente 9 equipes adicionais para cobertura total da população. Dessa forma, o parâmetro p da modelagem capacitada deveria ser definido como 27 (18 unidades existentes mais as 9 novas unidades). Entretanto, ao testar a modelagem com $p = 27$, o problema apresentou inviabilidade. Isso ocorre devido a uma limitação do modelo, uma vez que, a população de um mesmo setor censitário não pode ser dividida entre diferentes Unidades Básicas de Saúde (UBS). Assim, cada setor

deve ser atendido por uma única unidade, o que pode gerar incompatibilidades entre a demanda e a capacidade disponível, mesmo quando a capacidade total global aparenta ser suficiente.

Diante disso, optou-se por aumentar o valor de p para 33, buscando maior adaptabilidade na alocação da demanda e reduzindo a sobrecarga nas unidades. Ainda assim, é possível observar, que a maioria das unidades opera próxima ao limite de capacidade, com 20 das 33 unidades atendendo até 90% de sua capacidade máxima.

A Figura 6 apresenta a solução obtida pelo modelo de P-Mediana Capacitada para o município de Sabará-MG. Nessa abordagem, considerou-se os 291 setores censitários como pontos de demanda e, simultaneamente, como possíveis locais candidatos a centros de atendimento, assim como na modelagem anterior. A modelagem também utilizou distâncias euclidianas em metros entre os centroides dos setores, as demandas populacionais de cada setor e, fundamentalmente, as restrições de capacidade máxima operacional por unidade.

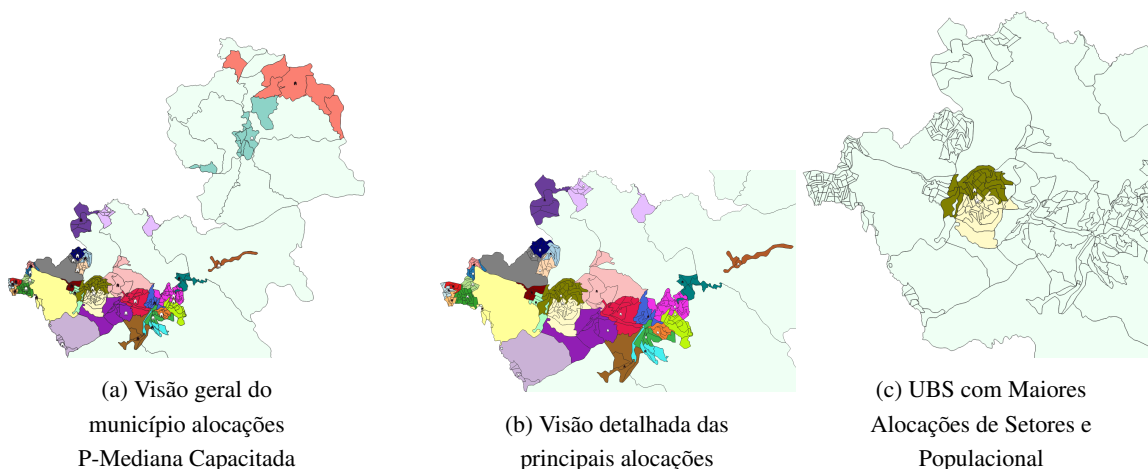


Figura 6: Solução P-Mediana capacitada com alocações ótimas e atuais

Diferente da abordagem anterior, essa modelagem foi executada com $p = 33$. Essa escolha visa representar o cenário atual de atendimentos das 18 unidades existentes, respeitando a presença das UBS atuais e a capacidade instalada de suas respectivas equipes. O modelo selecionou centros com alocações variando de 3 setores, em áreas menos densas, até 25 setores em regiões com maior concentração populacional.

Cabe destacar que as 18 UBS atualmente existentes totalizam 34 equipes de Saúde da Família (eSF). Com a implementação da presente modelagem, estima-se a ampliação para um total de 49 eSF, aumentando a capacidade de atendimento à população.

Na Figura 6 os marcadores em preto representam os locais sugeridos pela modelagem matemática, enquanto os marcadores em branco indicam as UBS já existentes no município. Observa-se que a maior concentração de alocações ocorre em unidades que comportam mais de uma equipe, ou seja, unidades já existentes. Em especial, destacam-se a unidade UBS Vilas Reunidas (destacada em verde na Figura 6c), que possui capacidade para 12.000 pessoas (quatro eSF), e a capazes de atender até 9.000 pessoas (equivalente a três eSF) e a UBS General Carneiro, (em amarelo claro na Figura 6c), com capacidade para 9.000 pessoas (três eSF).

Conforme os resultados do modelo capacitado, a UBS Vilas Reunidas atingiu uma carga de 11.724 pessoas, enquanto a UBS General Carneiro registrou 8.934 pessoas. Em ambos os casos, as unidades operam com uma taxa de utilização superior a 90%, indicando que a modelagem otimizou o uso da infraestrutura existente até o limite permitido, garantindo assim, a eficiência máxima

no atendimento, sem ultrapassar o seu limite.

4.2. Resultados dos modelos

A partir das projeções espaciais e dos dados obtidos, observa-se que as UBS tendem a ser alocadas em locais persistentes nas diferentes simulações. Isso ocorre porque o modelo de P-Mediana prioriza a proximidade com áreas de maior densidade de demanda para minimizar a distância total ponderada.

Para tornar a modelagem mais aderente à realidade operacional, foi incorporada a restrição de capacidade. Essa modelagem considera o limite de atendimento associado às Equipes de Saúde da Família (eSF), respeitando a capacidade definida para cada unidade. Ressalta-se que a distância foi calculada de forma euclidiana, uma vez que a matriz baseada na malha viária apresentou inconsistências de conectividade que tornariam a matriz final de custos inviável para o processamento.

A Tabela 3 apresenta uma análise comparativa das cargas populacionais entre a rede atual e os modelos de otimização utilizados. Os dados expostos demonstram que o cenário atual opera em desequilíbrio, na qual a maior carga registrada é de 15.442 pessoas na UBS Vilas Reunidas, enquanto a menor é de 3.138 na UBS Castanheiras. É de suma importância destacar que, ambos os extremos expostos desse cenário atuam com a demanda superior a capacidade das equipes de saúde presentes nas unidades. Mesmo na unidade de menor carga, o volume presente de pessoas ultrapassa o limite.

Métrica de Carga	Cenário Atual	Modelo Clássico	Modelo Capacitado
Maior Carga (População)	15.442*	6.737	11.724*
Menor Carga (População)	3.138	577	589
Carga Média	7.100,50	3.759,09	3.873,00

* Valor condizente com unidades de múltiplas equipes (Capacidade: 12.000).

Fonte: Dados do SISAB/IBGE e resultados da otimização via CPLEX.

Tabela 3: Comparativo de Carga Populacional: Cenário Atual vs. Modelos de Otimização

Por outro lado, os modelos de localização buscam mitigar tal desigualdade. O modelo P-Mediana Clássica, reduz a carga máxima para 6.737 pessoas, entretanto esse modelo ignora as limitações das unidades, resultando em taxas de utilização que chegam a 179%, 79% acima da capacidade. Já o modelo P-Mediana Capacitada demonstra ser a solução mais balanceada, embora sua maior carga seja de 11.724 pessoas, este valor ainda se encontra dentro do permitido, uma vez que essa unidade opera com quatro equipes (capacidade de 12.000), mantendo a utilização em uma porcentagem segura, de 97,7%. Sendo assim, a modelagem capacitada não apenas otimiza a distância como garante uma viabilidade técnica mais próxima da realidade.

A análise dos mapas sugere que a distribuição atual das UBS pode ser insuficiente para atender à demanda populacional de forma equilibrada, contribuindo para a sobrecarga de algumas unidades e para desigualdades de acesso entre diferentes regiões do município. Para fins de comparação entre os cenários, a distância média por ponto foi calculada ponderada pela demanda, por meio da razão entre o valor da função objetivo e a população total atendida, isto é, $\frac{Z}{\sum d_j}$. Dessa forma, essa medida deve ser interpretada como a distância média percorrida por indivíduo, e não como um indicador médio por setor censitário.

Modelo	Função objetivo	Distância média por pessoa (m)	Tempo de execução
P-Mediana Clássica	44876986.52	351.13	0 min 15 s
P-Mediana Capacitada	56986435.13	445.88	30 min 51 s

Tabela 4: Comparação de desempenho e resultados: modelo clássico vs. capacitado

Os modelos clássico e capacitado foram resolvidos pelo CPLEX com status, respectivamente, de solução ótima e solução inteira ótima dentro da tolerância do solver. A formulação clássica apresentou 84.972 variáveis e 84.973 restrições, enquanto a capacitada apresentou 84.972 variáveis e 85.555 restrições.

Os resultados obtidos por meio do solver IBM ILOG CPLEX mostram que a P-Mediana Clássica atingiu função objetivo de 44.876.986,52, resultando em uma distância média de aproximadamente, 351.13m. Esse modelo foi resolvido em 15 segundos.

Por outro lado, a P-Mediana Capacitada apresentou função objetivo de 56.986.435,13, com aumento da distância média para aproximadamente 445.88m. Esse aumento indica que a inclusão de restrições de capacidade torna a solução mais aderente às limitações operacionais do sistema, porém implica em maior deslocamento médio da população, evidenciando o trade-off entre eficiência espacial e viabilidade operacional. Os experimentos foram executados em um processador i5 de 8ª geração com 8 GB de RAM.

Portanto, a aplicação do modelo P-Mediana Capacitada, apresentada na Figura 6, não deve ser interpretada como a solução de menor deslocamento médio, mas como uma alternativa mais aderente à realidade operacional. Ao respeitar limites de capacidade, o modelo evita a concentração excessiva da demanda em um número reduzido de unidades e promove uma distribuição territorial mais equilibrada do atendimento. Por fim, é possível observar que algumas UBS sugeridas apresentam um grande proximidade entre si ou atendem a volumes relativamente baixos de demanda. Nessas situações, indica-se que a gestão pública avalie a possibilidade de ampliação da capacidade de unidades já existentes, por meio do aumento do número de equipes, em substituição à implantação de múltiplas unidades relativamente próximas.

5. Considerações finais

Neste trabalho, foi analisada a distribuição espacial das Unidades Básicas de Saúde no município de Sabará-MG, considerando setores censitários, localização das unidades existentes, demanda populacional e capacidade de atendimento associada às Equipes de Saúde da Família. Para isso, foram aplicados modelos de localização baseados em P-Mediana, em suas versões clássica e capacitada, com o objetivo de identificar locais candidatos para expansão da rede ou ampliação da capacidade das unidades já existentes.

Os resultados indicaram que a configuração atual das UBS é insuficiente para atender toda à demanda populacional de forma equilibrada, especialmente quando considerada a restrição de capacidade de 3.000 pessoas por eSF. A P-Mediana Clássica apresentou menor valor de função objetivo e menor distância média, mas concentrou unidades em regiões de maior densidade populacional e gerou soluções com UBS extremamente sobrecarregadas. Já o modelo capacitado apresentou maior deslocamento médio, porém gerou uma solução mais aderente à realidade operacional, ao respeitar limites de atendimento e favorecer uma cobertura territorial mais equilibrada.

Observou-se que a maior parte das unidades foram alocadas em regiões de alta demanda populacional, um comportamento comum para a modelagem matemática da P-Mediana, que visa minimizar o custo total de deslocamento. Entretanto, é de suma importância ressaltar, que não necessariamente as áreas mais densas são as mais dependentes do Sistema Único de Saúde em comparação com regiões mais marginalizadas. Durante o desenvolvimento dessa pesquisa não foi

possível obter dados que permitissem identificar de forma mais precisa as regiões com maior dependência do SUS. Dessa forma, a modelagem adotada baseou-se na distribuição da população total, o que constitui uma limitação do estudo.

Por fim, conclui-se que a otimização da localização das UBS em Sabará-MG pode apoiar decisões relacionadas tanto à abertura de novos postos quanto à ampliação do número de equipes em unidades já existentes. Como trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de indicadores de vulnerabilidade social e índices de SUS-dependência na modelagem. Além disso, sugere-se a utilização de matrizes de custo baseadas na malha viária real e a validação dos cenários junto a gestores públicos, de modo a aproximar a modelagem das condições reais de deslocamento e das necessidades específicas da população vulnerável.

Referências

- Ahmadi-Javid, A., Seyedi, P., e Syam, S. S. (2017). A Survey of Healthcare Facility Location. *Computers & Operations Research*, 79:223–263.
- Brasil (1988). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Acesso em: 19 jun. 2025.
- Brasil (2017). Portaria nº 2.436, de 21 de setembro de 2017. Aprova a Política Nacional de Atenção Básica. Ministério da Saúde. Acesso em: 19 jun. 2025.
- Brasil (2025). Unidades Básicas de Saúde do Governo Federal. Secretaria Especial de Comunicação Social. Acesso em: 19 jun. 2025.
- Calixto, J. B., Borges, P. P., e Pessoa, L. d. S. (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, CE. Galoá.
- Costa, K. B., Franco, D. G. d. B., Souza, W. d. S., e Costa, C. V. d. (2025). Otimização da distribuição de medicamentos essenciais em Unidades Básicas de Saúde. *Textos para Discussão LabCit/GEDRI*, 6(1):227–248.
- Daskin, M. S. (2013). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2 edition.
- Dreux, V. P. (2004). Uma avaliação da legislação urbanística na provisão de equipamentos urbanos, serviços e áreas de lazer em conjuntos habitacionais. Dissertação (mestrado em planejamento urbano e regional), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Goudard, B., Oliveira, F. H. d., e Gerente, J. (2015). Avaliação de modelos de localização para análise da distribuição espacial de Unidades Básicas de Saúde. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67(1):15–34.
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. *Operations Research*, 12(3):450–459.
- IBGE (2024). Censo 2022: 87% da população brasileira vive em áreas urbanas. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Acesso em: 24 abr. 2026.