

Identificação de bases aéreas para operação das aeronaves KC-390 utilizando o modelo p-mediana

Ricardo Alexandre Fachiano Junior  0009-0002-3150-0115

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil

Mauro Caetano  0000-0002-5978-1054

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil

Joyce Carolynne de Melo Silvestre  0000-0003-0081-0524

Instituto de Aplicações Operacionais, IAOp, Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, DCTA, São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

A aviação de transporte desempenha um papel fundamental na ampliação da capacidade de movimentação e na capacidade de atuação dos recursos de combate e defesa, essenciais para garantir a soberania do espaço aéreo brasileiro. Com isso, nesse estudo, a partir da utilização do modelo de programação linear p-mediana, busca-se determinar a melhor localização entre bases aéreas já existentes no Brasil para receber as operações das novas aeronaves KC-390, substitutas do C-130 Hércules. Foram analisados dois anos de missões realizadas por essas aeronaves, totalizando 1.354 registros de voos em 2022 e 1.556 em 2023. A aplicação do modelo p-mediana revelou que as bases localizadas em Manaus/AM, Brasília/DF e Rio de Janeiro/RJ foram identificadas como as mais indicadas para otimizar a alocação da frota de KC-390 em função das operações realizadas nos dois últimos anos, considerando a minimização da distância entre as bases e os aeródromos demandantes, ponderado pelo número de operações em cada aeródromo. O estudo contribui para a gestão eficiente de recursos logísticos e operacionais da Força Aérea Brasileira, destacando a relevância estratégica das localizações propostas.

Palavras-chave: Alocação da Frota; Força Aérea Brasileira; KC-390.

Identification of air bases for KC-390 aircraft operation using the p-median model

ABSTRACT

Transport aviation plays a crucial role in enhancing the mobility and operational capacity of combat and defense resources essential to ensuring the sovereignty of Brazilian airspace. This study applies the p-median linear programming model to determine the best location within existing airbases to receive the new KC-390 aircraft and replacements for the C-130 Hercules. The study analyzed two years of missions

conducted by these aircraft, totaling 1,354 flight records in 2022 and 1,556 in 2023. Application of the p-median model revealed that bases located in Manaus/AM, Brasília/DF, and Rio de Janeiro/RJ are the most suitable for optimizing the allocation of the KC-390 fleet, considering the minimization of distances in meeting demands weighted by the number of operations at each aerodrome. This study contributes to efficiently managing the Brazilian Air Force's logistical and operational resources, highlighting the strategic relevance of the proposed locations.

Keywords: Fleet Allocation; Brazilian Air Force; KC-390.

Identificación de bases aéreas para la operación de las aeronaves KC-390 utilizando el modelo p-mediana

RESUMEN

La aviación de transporte desempeña un papel fundamental en la ampliación de la capacidad de movimiento y en la capacidad de actuación de los recursos de combate y defensa esenciales para garantizar la soberanía del espacio aéreo brasileño. En este estudio, a partir de la utilización del modelo de programación lineal p-mediana, se busca determinar la mejor ubicación entre las bases aéreas ya existentes en Brasil para recibir las operaciones de las nuevas aeronaves KC-390, sustitutas del C-130 Hércules. Se analizaron dos años de misiones realizadas por estas aeronaves, totalizando 1.354 registros de vuelos en 2022 y 1.556 en 2023. La aplicación del modelo p-mediana reveló que las bases ubicadas en Manaus/AM, Brasília/DF y Rio de Janeiro/RJ fueron identificadas como las más indicadas para optimizar la asignación de la flota de KC-390 en función de las operaciones realizadas en los dos últimos años, considerando la minimización de la distancia entre las bases y los aeródromos demandantes, ponderado por el número de operaciones en cada aeródromo. El estudio contribuye a la gestión eficiente de recursos logísticos y operacionales de la Fuerza Aérea Brasileña, destacando la relevancia estratégica de las ubicaciones propuestas.

Palabras clave: Asignación de la Flota; Fuerza Aérea Brasileña; KC-390.

1 INTRODUÇÃO

A aviação de transporte desempenha um papel fundamental na ampliação da mobilidade e da capacidade operacional dos recursos de combate, essenciais para garantir a soberania do espaço aéreo brasileiro, destacando-se como um elemento crucial para a qualidade e eficácia das missões conduzidas pela Força Aérea Brasileira (FAB) (Brasil, 2023). A gestão eficiente desses recursos, especialmente no contexto do Transporte Aéreo Logístico (TAL), bem como a alocação adequada dos meios aéreos impacta diretamente a capacidade operacional da instituição, sendo essencial para o aproveitamento máximo dos recursos disponíveis, exigindo a otimização do seu emprego e assegurando que cada missão seja realizada de maneira eficaz e econômica.

Neste contexto de planejamento estratégico e otimização de recursos, surgem desafios



específicos, como a alocação eficiente da frota. Desde 1964, o Brasil utilizou a aeronave C-130 Hércules como o principal meio para missões de lançamento de tropas e suprimentos, reabastecimento em voo, operações aéreas na Antártica, além de missões especiais de busca e salvamento na Região de Informação de Voo do Atlântico e combate a incêndios florestais (Brasil, 2023). Já na vanguarda, o projeto KC-390 Millennium, por sua vez, representa um avanço significativo na capacidade de transporte militar da FAB.

Desenvolvido no âmbito do projeto KC-X pela indústria nacional, o KC-390 foi concebido para realizar as missões anteriormente atribuídas ao C-130, vindo então a substituir essas aeronaves (Brasil, 2018). Desde 2019, o KC-390 está em operação no 1º Grupo de Transporte de Tropa (1º GTT), com sede em Anápolis (GO), e, a partir de 2022, no 1º/1º Grupo de Transporte (1º/1º GT), localizado no Rio de Janeiro. Em abril de 2023, a aeronave obteve a certificação de Full Operational Capability (FOC), representando um significativo avanço operacional para a FAB (Brasil, 2023). Para a realização desse estudo, foram analisados os dados disponibilizados pelo Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE, 2024), referentes a dois anos de missões das aeronaves C-130 e KC-390, que resultaram em 1.354 registros de voos em 2022 e 1.556 registros de voos em 2023. A análise exploratória dos dados foi necessária para compreensão da disposição geográfica das missões, de modo a fornecer inferências necessárias para a aplicação do modelo de programação linear p-mediana com vistas a auxiliar na alocação ótima das aeronaves KC-390 a serem recebidas e incorporadas à frota da FAB.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O problema de localização refere-se a um campo da pesquisa operacional que se concentra em determinar os melhores locais para a instalação de serviços ou infraestrutura. Daskin (1995) afirma que a maioria das instituições, tanto do setor público quanto do privado, enfrenta, ao longo de sua existência, o desafio de encontrar localizações adequadas para suas instalações, como bases de veículos de patrulha, estações de bombeiros e ambulâncias. Ballou (1991) destaca que, na década de 1990, encontrar localizações fixas ao longo da rede da cadeia de suprimentos constitui um problema decisório de grande relevância, moldando a forma, a estrutura e os contornos de toda a cadeia. Segundo o autor, as instalações englobam pontos nodais da rede, como fábricas, portos, fornecedores, armazéns e centros de serviço, que estão localizados de maneira central na estrutura da cadeia de suprimentos.

O problema de localização de instalações centrais, conforme um estudo clássico desenvolvido por Reville e Swain (1970), consiste em designar m de n comunidades, em que $m < n$, como centros, de forma a minimizar a distância ou o tempo médio percorrido por um indivíduo. Os autores demonstram que a distância (ou tempo) média é igual à soma dos produtos da população e das milhas (ou minutos) percorridos, dividida pela soma das populações, conforme apresentado na Equação 1.

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i s_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (1)$$



onde a é a população da i -ésima comunidade e s é a distância (ou tempo) que os indivíduos da i -ésima comunidade precisam percorrer até um centro. A média das distâncias (ou tempos) percorridos por todos os indivíduos é representada por \bar{S} .

O problema da localização é utilizado para a otimização de custos operacionais, distância, tempo de resposta, cobertura de demanda e eficiência logística. Considerando o desenvolvimento e a disseminação de ferramentas de matemática aplicada e a utilização dos instrumentos computacionais, o modo como se avalia a localização das instalações é pautado muito mais em modelos matemáticos do que em modelos conceituais. Com isso, o problema de localização de p -medianas é amplamente reconhecido como um problema clássico, pois busca determinar a localização de p instalações (medianas) em uma rede, de forma que a soma das distâncias entre cada nó de demanda e a mediana mais próxima seja minimizada.

Para alcançar o resultado desejado neste estudo, foi utilizado o modelo de programação linear p -mediana, que define a Base Aérea já existente que possui a melhor localização, de modo a minimizar as distâncias entre os pontos de demanda e a facilidade em questão, tornando-se uma opção fundamentada e relevante para receber as novas aeronaves KC-390, já considerando a existência do Esquadrão 1º GTT, que opera a partir da Base Aérea de Anápolis e do 1º/1º GT, operando na Base Aérea do Galeão. A relevância deste estudo é reforçada pela DCA 400-75 (2023), que afirma que poderão existir outras bases além das duas já existentes para operação e desdobramento das aeronaves KC-390 em um breve futuro.

O problema das p -medianas é um dos modelos mais populares na literatura sobre localização de instalações discretas. Esse modelo envolve a localização de p instalações para atender a um conjunto de n clientes, de modo que cada cliente seja atribuído a uma única instalação e que a distância média ponderada entre todos os clientes e suas respectivas instalações seja minimizada (Croci *et al.*, 2023).

Um dos primeiros modelos foi proposto por Hakimi (1964). Desde então, esse modelo tem sido utilizado como base para resolver diversas questões relacionadas à localização. Já Silva e Mestria (2017) apresentam um modelo de programação inteira mista, baseado no método da p -mediana, para encontrar estações de serviço dentro de um conjunto de locais candidatos de um conjunto de centros demandantes, conforme Equações de 2 a 9.

Variáveis de decisão:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{se a estação candidata } j \text{ foi selecionada;} \\ 0, & \text{do contrário.} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o centro de demanda } i \text{ é coberto pela estação } j; \\ 0, & \text{do contrário.} \end{cases} \quad (3)$$

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} y_{ij} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n y_j = p, \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (6)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (7)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (8)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (9)$$

onde:

J: conjunto de locais candidatos a receber a estações de serviço;

I: conjunto de centros de demanda;

d_{ij} : distância, ou custo, de um centro de demanda i a uma estação de serviço j ;

p : número de estações a serem abertas (alocadas).

A função representada pela Equação 4 define a função de otimização, cujo objetivo é minimizar o custo total ponderado da demanda. A Equação 5 impõe a restrição de que o número de estações a serem abertas deve ser exatamente igual a p . A Equação 6 garante que toda a demanda do centro de demanda i seja atendida. A Equação 7 assegura que cada centro de demanda só possa ser associado a uma estação de serviço que foi selecionada. Por fim, as Equações 8 e 9 estabelecem que as variáveis de decisão devem ser binárias (0 ou 1) e não negativas (Silva e Mestria, 2017).

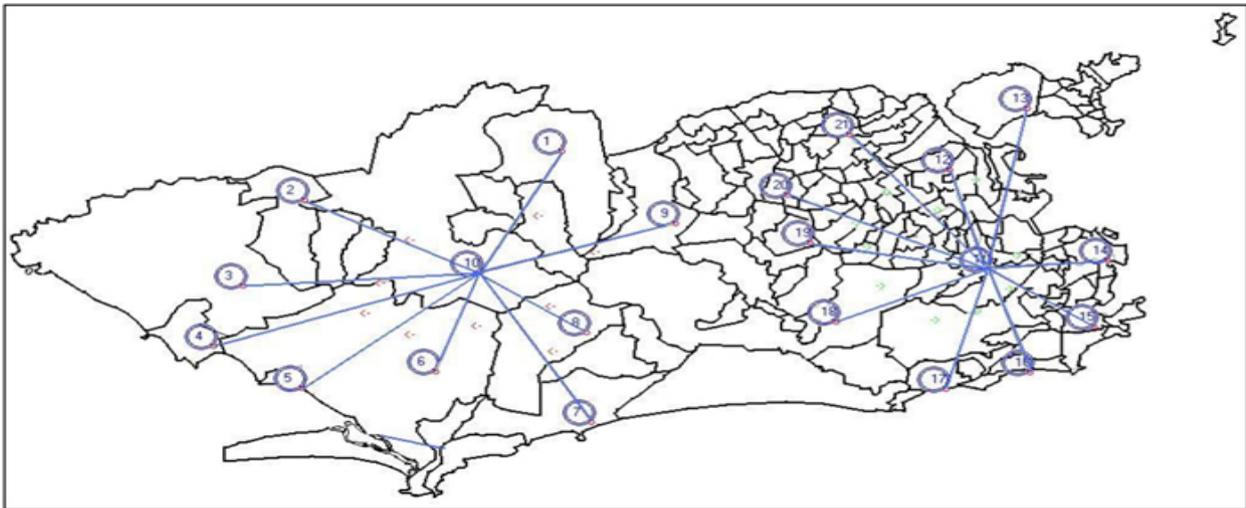
Um relevante estudo sobre localização de bases de aeronaves pode ser encontrado em Pizzolato, Raupp e Alzamora (2012), que propõem a localização de duas bases de helicópteros para a polícia do estado do Rio de Janeiro, utilizando como referência o mapa do estado com seus diversos bairros na observação e no combate a ações criminosas. A Figura 1, que representa a localização otimizada de duas bases de helicópteros no município do Rio de Janeiro, demonstra uma aplicação prática do modelo de p -medianas para encontrar o melhor posicionamento das aeronaves, visando minimizar o tempo de deslocamento até o local da ocorrência. Essa rapidez é necessária devido à importância de realizar a observação e a coleta de informações sobre o ocorrido, de modo a auxiliar nas ações de superfície. O estudo utilizou como indicador para ponderar seus resultados, o número de ocorrências para cada 10 mil habitantes, aproximando, assim, as bases dos bairros com maior índice de ocorrências.

O modelo de programação linear p -mediana tem se mostrado muito versátil para problemas de localização, sendo aplicado a diversos temas e servindo como base para o desenvolvimento de algoritmos e heurísticas. Uma variação na utilização do modelo das p -medianas foi



proposta por Silva (2019) por meio da criação de um algoritmo estocástico para localização de Bases de Resgate Aéreo, que utiliza conceitos de otimização combinatória para avaliar cada combinação possível entre pontos candidatos a centros de facilidades, considerando as medianas centradas nesses pontos e nos demais. A base de dados consiste em uma planilha contendo as coordenadas de latitude e longitude das localidades. O algoritmo define dois níveis de facilidades, executando o cálculo das p -medianas em duas etapas: na primeira etapa, são definidas as facilidades de primeiro nível; na segunda etapa, o conjunto inicial de pontos candidatos é substituído pelas facilidades definidas na primeira etapa, resultando nas facilidades de segundo nível. Dessa forma, um conjunto inicial de pontos é reduzido a um subconjunto $M < N$ na primeira execução, que será a entrada para a segunda aplicação, resultando em um subconjunto $P < M$ na segunda execução (Silva, 2019).

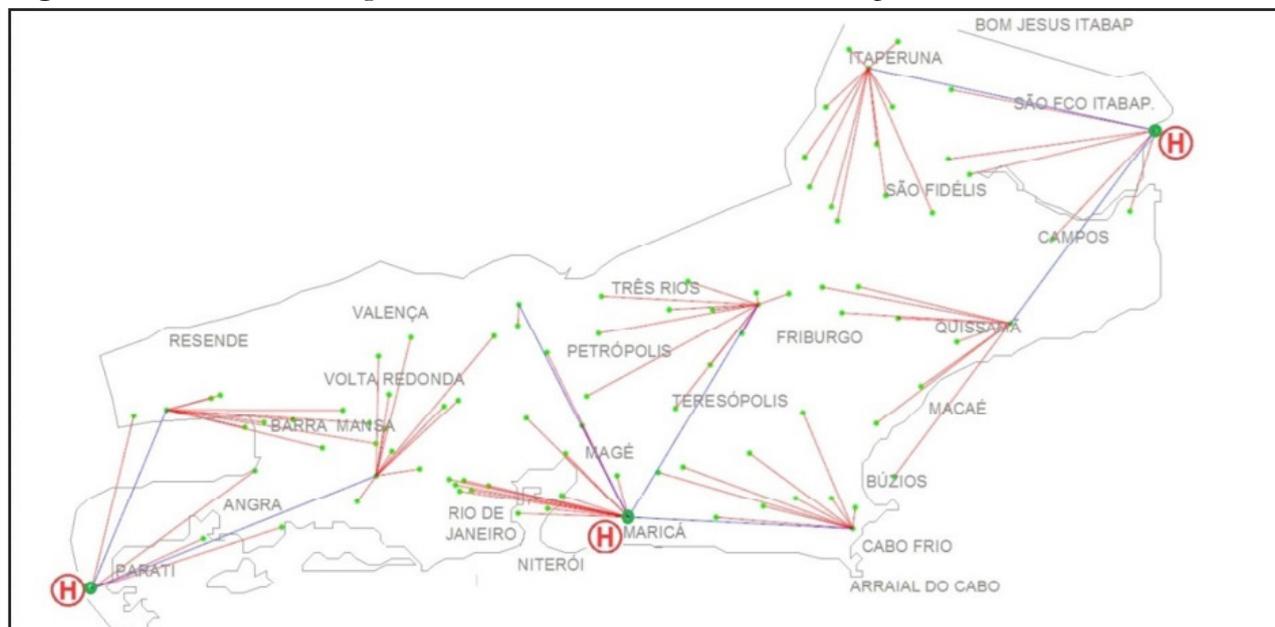
Figura 1: Localização de duas bases de helicópteros no município do Rio de Janeiro.



Fonte: Pizzolato, Raupp e Alzamora (2012).

A Figura 2 representa a segunda etapa do algoritmo aplicado por Silva (2019), em que foram selecionados três pontos estratégicos para a criação de bases de resgate, localizados em Parati (RJ), Maricá (RJ) e São Francisco do Itabapoana (RJ). Essas bases serviriam como centros emergenciais em relação à base que possui o ponto de conexão terrestre localizada ao final de cada rota aérea. Os trechos abrangem o extremo sul, o centro e o extremo norte do estado.

Figura 2: Três centros de segundo nível conectados a dez centros de primeiro nível.



Fonte: Silva (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As missões realizadas pelas aeronaves KC-390 e C-130 nos últimos dois anos (2022 e 2023) foram selecionadas para estudo com o intuito de fornecer dados fundamentados para a tomada de decisão na FAB a respeito da localização de possíveis futuras Unidades Aéreas que operarão os novos vetores KC-390. Esse esforço visa preencher lacunas em estudos sobre problemas de localização dentro da FAB, considerando a relevância econômica e estratégica da correta localização dos meios, até então pouco explorada na literatura. Compreende-se que a decisão de alocação de frota é complexa e multifacetada. No entanto, o embasamento científico auxilia fortemente na tomada de decisões objetivas e alinhadas com o escopo em que estão inseridas.

Os dados foram coletados junto ao Comando de Operações Aeroespaciais (COMAE) e abrangem o período de janeiro de 2022 a dezembro de 2023. As informações permitiram identificar 35 variáveis associadas a cada missão realizada pelas aeronaves no ano de 2022 e 15 variáveis no ano de 2023, como, por exemplo, data da missão, trecho realizado, unidade aérea responsável, modelo da aeronave utilizada, aeroporto de decolagem, quantidade de passageiros transportados, cubagem, aeroporto de pouso, tempo total de voo. Para identificar os aeródromos onde foram realizadas as operações, adotou-se o código de identificação da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO). As aeronaves consideradas como referência neste estudo foram o KC-390 e o C-130, conforme Figuras 3 e 4, respectivamente.



Figura 3 - Aeronave KC-390 Millennium.

Fonte: Brasil (2024b).

Figura 4 - Aeronave C-130 Hercules.

Fonte: Brasil (2024c).

Desde de sua introdução em 2019, o KC-390 Millennium (Figura 3) tem mostrado um desempenho notável em diversas missões operacionais da FAB, incluindo o transporte de carga, logística e suporte humanitário. A aeronave se destaca principalmente por sua capacidade de carga, que comporta até 26 toneladas. Essa característica facilita o transporte de tropas, veículos militares e equipamentos, desempenhando um papel crucial nas operações. Além disso, sua habilidade para decolar e pousar em pistas curtas e não pavimentadas permite à FAB atuar em uma ampla variedade de cenários, incluindo regiões remotas e de difícil acesso (Brasil, 2024b).

Por outro lado, o C-130 Hercules (Figura 4), produzido pela Lockheed Martin, foi introduzido na frota da FAB em 1964, começando com a versão C-130E e, posteriormente, recebendo as variantes SC-130E (Busca e Salvamento/Reconhecimento), C-130H e KC-130H (Reabastecimento em Voo). Em 1983, a aeronave passou a dar apoio ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), completando cerca de 400 missões de suporte à pesquisa científica no continente Antártico. O C-130 também desempenhou missões humanitárias em países como Congo, El Salvador, Haiti, Peru e Chile, além de auxiliar no combate a incêndios no Chile. Durante a Operação COVID-19, o Hercules colaborou transportando aproximadamente 2 milhões de quilogramas de carga, 640 mil litros de oxigênio e mais de 20 usinas de oxigênio, demonstrando sua importância logística para as Forças Armadas Brasileiras (Brasil, 2024a). A aeronave KC-390 foi desenvolvida para cumprir missões muito semelhantes às realizadas pelo C-130, tendo a função de preservar o legado e superar as conquistas operacionais dessa aeronave, que acumulou 370 mil horas de voo na FAB.

3.1 Análise exploratória

Com base nas informações sobre todos os voos realizadas nos anos de 2022 e 2023, optou-se por segmentar os dados das missões de acordo com a quantidade de vezes em que as aeronaves foram demandadas em determinadas localidades. Assim, o número de decolagens realizadas foi consolidado por local de origem.

A análise de dados, conforme descrita por Tukey (1977), envolve um processo investigativo



que utiliza métodos visuais e estatísticos para explorar e compreender as características fundamentais dos dados antes de proceder com análises mais complexas ou a aplicação de métodos. O autor defende o uso de técnicas gráficas e quantitativas para descobrir padrões subjacentes, identificar anomalias e testar hipóteses iniciais, estabelecendo assim a base para uma análise mais detalhada. O enfoque de Tukey (1977) sobre a análise exploratória de dados é fundamental para garantir que as inferências e conclusões sejam baseadas em uma compreensão sólida e bem fundamentada dos dados disponíveis.

Para o tratamento e confecção do banco de dados utilizado neste estudo, foi utilizado o software R 4.3.2, empregado para a realização de análises exploratórias. Os dados foram, então, tratados para manipulação e mantidos no *dataframe* apenas os aeródromos com mais de 10 movimentos somados nos últimos 2 anos. Essa escolha foi feita de modo a focar nos aeródromos que possuem relevância operacional significativa, evitando a inclusão de locais com atividade muito esporádica que poderiam distorcer a análise geral.

3.2 Condução do problema p-mediana

O problema das p-medianas é explorado por Laporte, Nickel e Saldanha-da-Gama (2015) como o desafio de escolher locais para um número fixo de instalações, de modo que a distância total percorrida pelos usuários até a instalação mais próxima seja a menor possível. Este arranjo estratégico das instalações em uma região visa garantir que o acesso aos serviços seja o mais conveniente possível, minimizando o tempo e o custo de transporte para os usuários. Esse problema é crucial em várias aplicações práticas, desde a localização de serviços públicos e emergenciais até a logística de distribuição e o planejamento de redes de varejo, sublinhando a importância de uma solução eficiente que equilibre a proximidade aos clientes com a eficácia operacional.

No âmbito da FAB, uma Base Aérea se configura como uma organização militar que tem a responsabilidade de gerir as atividades relacionadas ao preparo das unidades subordinadas. Isso inclui a execução de diretrizes, ordens e planos emitidos pelo Comando de Preparo (COMPREP) e pelos órgãos centrais dos sistemas do Comando da Aeronáutica (COMAER). Além disso, a Base Aérea também é encarregada de gerenciar as atividades relativas ao emprego das unidades militares subordinadas. Isso é feito para garantir o cumprimento de ações de Força Aérea e operações militares específicas, conforme diretrizes, ordens e planos do Comando Operacional que possui o controle dos meios adjudicados pelo COMPREP.

Para formular uma equação de programação linear que escolha as melhores Bases Aéreas para abrigar os esquadrões que operam as aeronaves KC-390, com a intenção de minimizar as distâncias entre o aeródromo de partida e os aeródromos demandantes em que os vetores KC-390 e C-130 operaram nos últimos 2 anos, foi realizado um levantamento dos locais onde essas aeronaves operaram e realizada a ponderação pela quantidade de vezes em que essas aeronaves atuaram e feita a ponderação pela quantidade de vezes em que operaram nesses aeródromos. Para tanto, adotando a ponderação do modelo p-mediana de Pizzolato *et al.* (2012) e a estrutura do modelo de Silva e Mestria (2017), foram consideradas as Equações de 10 a 17 para este estudo.



Variáveis de decisão:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{se a Base Aérea } j \text{ foi selecionada;} \\ 0, & \text{do contrário.} \end{cases} \quad (10)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a localidade demandante } i \text{ é coberta pela base } j; \\ 0, & \text{do contrário.} \end{cases} \quad (11)$$

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i d_{ij} y_{ij} \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n y_j = p, \quad \forall j \in J \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (14)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (15)$$

$$x_j \in [0,1], \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$y_{ij} \in [0,1], \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (17)$$

onde:

J: conjunto de bases candidatas a receber as novas aeronaves KC-390;

I: conjunto de localidades demandantes;

d_{ij} : distância de uma localidade demandante a uma base aérea;

p : número de bases a serem abertas (alocadas);

w_i : a quantidade de vezes que em operou-se na localidade i nos últimos 2 anos.



A função objetivo, representada pela Equação 12, busca minimizar as distâncias ponderadas entre as localidades demandantes e as Bases Aéreas que operarão as aeronaves KC-390. A restrição da Equação 13 assegura que exatamente p Bases sejam abertas. A restrição da Equação 14 indica que cada localidade demandante i será atendida por exatamente uma estação j . A restrição da Equação 15 garante que uma localidade i só possa ser coberta por uma Base j que foi selecionada. Por fim, as restrições das Equações 16 e 17 impõem que as variáveis de decisão x_j e y_j sejam binárias, ou seja, podem assumir apenas os valores 0 ou 1.

As definições adicionais incluem: J como o conjunto de bases candidatas a receber as novas aeronaves KC-390; I como o conjunto de localidades demandantes; d_{ij} como a distância entre uma localidade demandante i e uma base aérea j ; p como o número de bases a serem abertas; e w_i como a quantidade de vezes que se operou na localidade i no período.

A aplicação desse modelo foi realizada em uma base de dados contendo os seguintes dados: i) Aeroporto, ii) Quantidade de decolagens, iii) Latitude e iv) Longitude. A partir dessa planilha, foi gerada uma matriz das distâncias euclidianas a ser utilizada na formulação. Na Figura 5 apresenta uma parte do código na linguagem de programação R utilizado para executar a formulação p-mediana aqui utilizada. **5** – Código utilizado para o modelo p-mediana

Figura 5 - Código utilizado para o modelo p-mediana no software R.

```
# Definir o modelo p-medianas com o número de medianas que você quer (por exemplo, p = 3)
num_pontos <- nrow(dados_matrix) # Número de aeródromos (30) #1
num_medianas <- 3 # Número de medianas #2

model <- MIPModel() %>%
  add_variable(y[j], j = 1:num_pontos, type = "binary") %>% #3
  add_variable(x[i, j], i = 1:num_pontos, j = 1:num_pontos, type = "binary") %>% #4
  set_objective(sum_over(quantidade_decolagens[i]*dists[i, j] * x[i, j], i = 1:num_pontos,
    j = 1:num_pontos), sense = "min") %>% #5
  add_constraint(sum_over(x[i, j], j = 1:num_pontos) == 1, i = 1:num_pontos) %>% #6
  add_constraint(sum_over(y[j], j = 1:num_pontos) == num_medianas) %>% #7
  add_constraint(x[i, j] <= y[j], i = 1:num_pontos, j = 1:num_pontos) #8
```

Fonte: Os autores

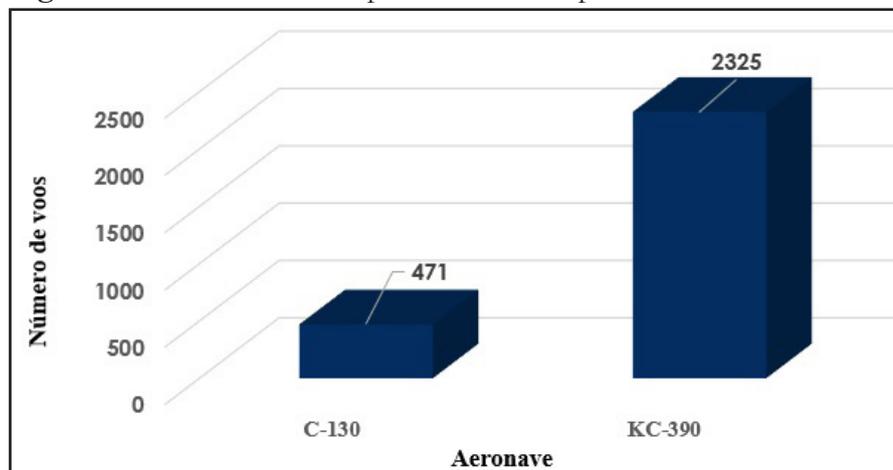
De acordo com a Figura 5, inicialmente o código estabelece o número de pontos (aeródromos) (#1) e o número de medianas desejadas. Caso haja a necessidade de selecionar mais aeródromos no estudo para operarem como bases, essa é variável que deve ser modificada (#2). Em seguida, é criado um modelo de programação matemática (MIPModel) com variáveis binárias e que representam se uma instalação é escolhida como mediana e se um ponto de demanda é atendido por uma mediana específica, respectivamente (#3, #4). A função objetivo é definida para minimizar as distâncias entre os pontos de demanda e as medianas selecionadas, ponderadas pelo número de decolagens na localidade (#5). As restrições garantem que cada ponto de demanda seja atendido por exatamente uma mediana (#6), que o número especificado de medianas seja escolhido (#7), e que os pontos de demanda só possam ser atendidos por medianas que foram selecionadas (#8). Este código implementa a formulação clássica do problema de p-medianas, otimizando a localização das instalações para minimizar as distâncias entre os aeródromos escolhidos como bases e as localidades demandantes.



4 RESULTADOS

Como resultado inicial, a quantidade de voos realizados pelas aeronaves C-130H e KC-390 entre os anos de 2022 e 2023 pode ser identificada na Figura 6, demonstrando que o KC-390 realizou um total de 2.325 voos, enquanto o C-130H completou 471 voos no mesmo período. Foram analisados, naquele momento, todos os voos realizados por ambas as aeronaves no período, considerando inclusive os voos a aeródromos com menos de 10 missões.

Figura 6 - Número de voos por aeronave no período de 2022 e 2023.

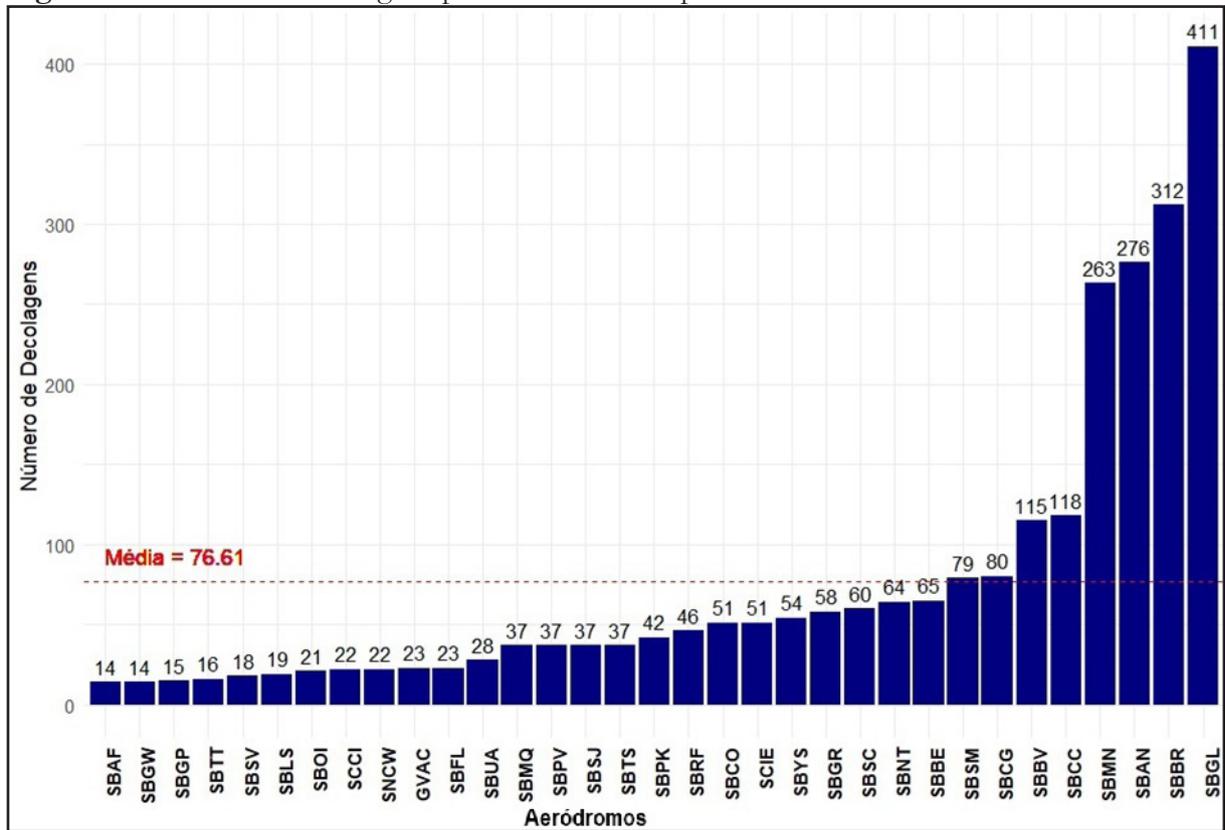


Fonte: COMAE (2024).

Essa distribuição, apresentada na Figura 6, demonstra uma predominância significativa do KC-390 nas operações entre 2022 e 2023, representando aproximadamente 83,1% do total de voos realizados, em comparação aos 16,9% realizados pelo C-130H. Isso indica o processo de transição das missões do C-130 para o KC-390.

Para compreender melhor as localidades onde as missões estavam sendo realizadas por ambas as aeronaves, inicialmente foi feita a separação das decolagens por aeródromo. O gráfico apresentado na Figura 7 ilustra o número de decolagens realizadas pelas aeronaves C-130H e KC-390 a partir de diversos aeródromos, considerando apenas aqueles com mais de 10 missões.

A média de decolagens entre os aeródromos incluídos é de 76,61, conforme indicado pela linha vermelha pontilhada. Os aeródromos do Rio de Janeiro/RJ (SBGL), Brasília/DF (SBBR), Anápolis/GO (SBAN) e Manaus/AM (SBMN) destacam-se como os mais ativos, com 411, 312, 276 e 263 decolagens, respectivamente. Isso reflete a importância relativa estratégica dessas localidades para a FAB devido à sua infraestrutura robusta e localização geográfica que facilitam uma grande quantidade de operações aéreas e suporte logístico.

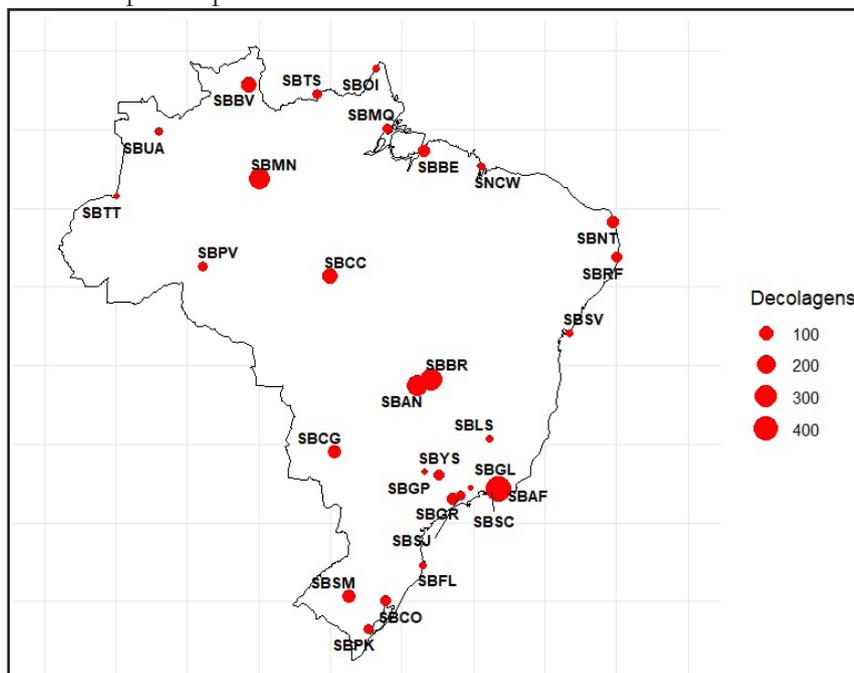
Figura 7 - Número de decolagens por aeródromo no período de 2022 e 2023.

Fonte: COMAE (2024).

Para melhorar a compreensão sobre a disposição das missões realizadas apenas no Brasil, gerou-se um mapa de dispersão geográfica que revela que os aeródromos com maior número de decolagens estão estrategicamente localizados em pontos-chave do território brasileiro, apresentado na Figura 8. A concentração de operações nesses aeródromos indica sua importância estratégica para a FAB, tanto para missões logísticas quanto para o apoio a operações em regiões remotas e de fronteira. Nota-se a dispersão das missões realizadas por todo o território nacional e uma possível concentração nas regiões Norte, Sudeste e Centro-Oeste.



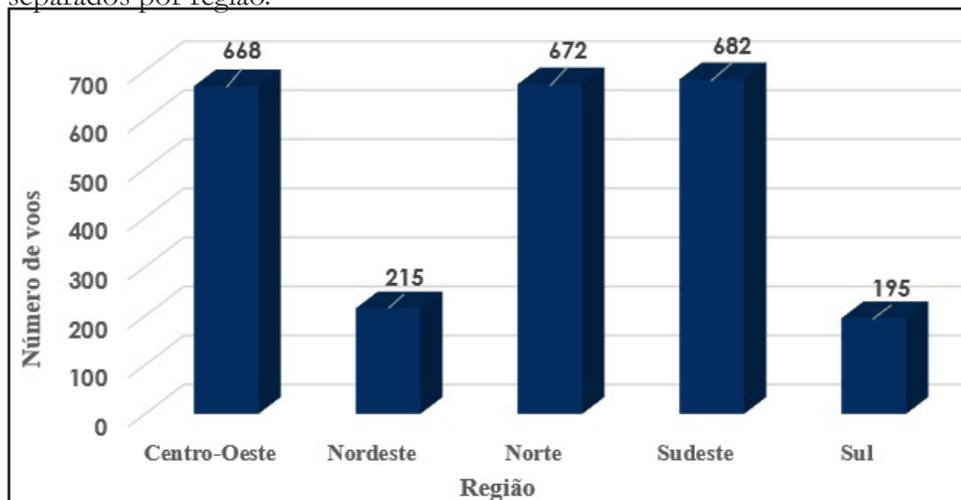
Figura 8 - Mapa de dispersão geográfica do número de decolagens no Brasil para o problema analisado..



Fonte: COMAE (2024).

A distribuição geográfica das decolagens confirma a importância estratégica das regiões Sudeste, Norte e Centro-Oeste para a FAB. A Figura 9 revela uma maior concentração de decolagens na região Sudeste, seguida pela região Norte e, então, na região Centro-Oeste.

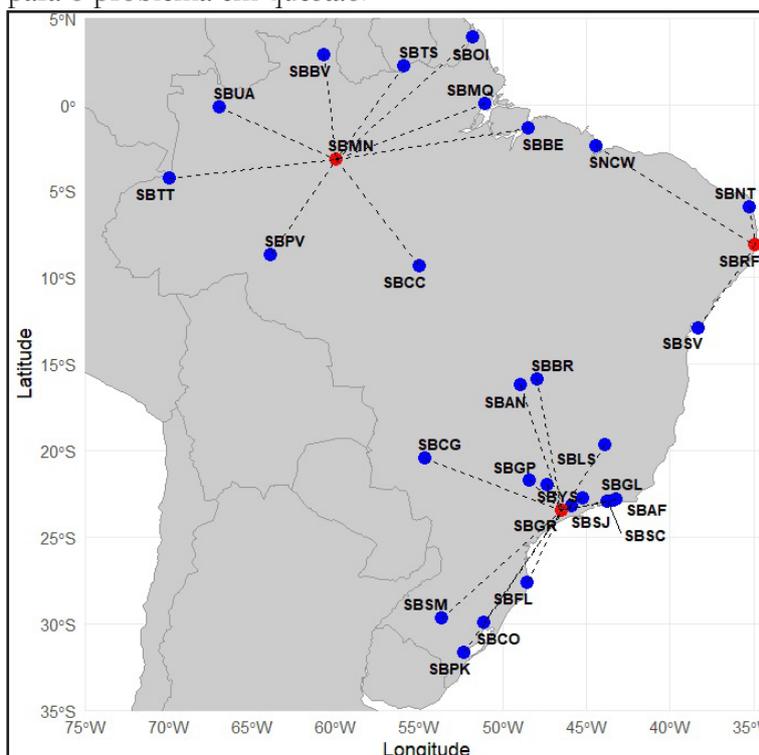
Figura 9 - Gráfico do número de decolagens no período de 2022 e 2023 separados por região.



Fonte: COMAE (2024).

Ao iniciar a aplicação do modelo p-medianas, observa-se na Figura 10 a localização dos aeródromos no Brasil, com destaque para aqueles selecionados como medianas, marcados em vermelho, e as conexões entre os aeródromos de demanda e suas respectivas medianas, representadas por linhas tracejadas. Nesse caso específico, não foram utilizadas informações para ponderar os resultados, ou seja, não se considerou o número de vezes em que as aeronaves operaram nos aeródromos em questão. Foi solicitado que fossem selecionadas três medianas dentre todos os aeródromos onde as aeronaves C-130 e KC-390 operaram mais de dez vezes nos últimos dois anos, com o objetivo de atender aos 30 aeródromos nacionais analisados. As medianas obtidas foram os aeródromos SBMN, SBRF e SBGR, que minimizam as distâncias entre os aeródromos demandantes.

Figura 10 - Resultado do modelo p-mediana sem ponderação para o problema em questão.

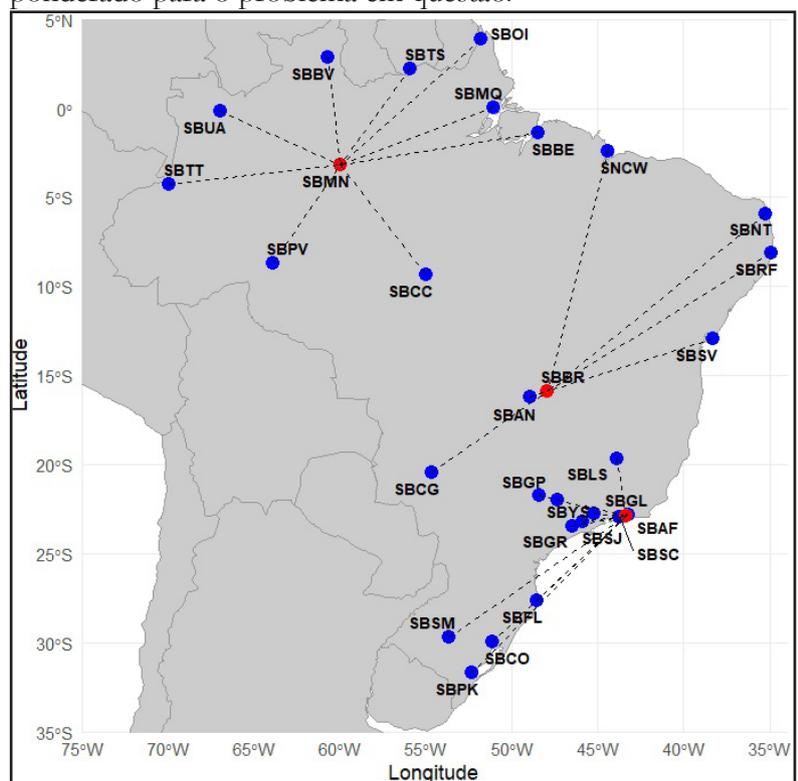


Fonte: Os autores

A distribuição das medianas sugere uma otimização geográfica que minimiza a soma das distâncias, atendendo às demandas distribuídas de maneira equilibrada pelo território brasileiro. As linhas de conexão indicam a relação direta entre cada aeródromo de demanda e a mediana mais próxima, que reflete a eficácia do modelo em reduzir a distância total de deslocamento. Observa-se que, se não for considerada a quantidade de operações realizadas, a disposição ideal para as bases aéreas do KC-390 incluiria uma na região Norte (SBMN), uma na região Nordeste (SBRF) e uma na região Sudeste (SBGR). Atualmente, porém, existem apenas duas bases que operam o KC-390: uma na região Sudeste (SBGL) e outra na região Centro-Oeste (SBAN).

A Figura 11 apresenta um resultado semelhante, porém, neste caso, a aplicação da função objetivo minimiza a soma das distâncias ponderadas pelo número de decolagens em cada aeródromo demandante, aproximando o resultado aos aeródromos mais movimentados.

Figura 11 - Resultado da aplicação do modelo p-mediana ponderado para o problema em questão.



Fonte: Os autores

Esse resultado é particularmente relevante para a logística de operações aéreas, pois maximiza a eficiência das rotas e minimiza os custos operacionais, assegurando que os aeródromos com maior número de decolagens tenham acesso otimizado às medianas. A formulação utilizada assegura que exatamente três medianas sejam escolhidas e que cada aeródromo seja alocado a uma única mediana, respeitando a estrutura binária das variáveis de decisão.

A partir desse resultado, observa-se que as Unidades Aéreas 1º GTT, com sede em Anápolis, e 1º/1º GT, localizado no Galeão, estão estrategicamente posicionadas, conforme o estudo realizado. No entanto, para a alocação eficiente da frota, seria fundamental estabelecer uma Unidade Aérea na localidade de Manaus, a fim de atender a toda a demanda existente na região Norte do país. A análise dos dados operacionais das missões realizadas entre 2022 e 2023 pelas aeronaves KC-390 e C-130 reforça a relevância estratégica da Base Aérea de Manaus (SBMN) para a Força Aérea Brasileira. Com 263 decolagens em SBMN e 672 na região Norte durante o período analisado, Manaus destacou-se como um dos aeródromos mais demandados, refletindo sua importância logística em uma região caracterizada por vastas áreas de difícil acesso terrestre e elevada dependência do transporte aéreo.

A aplicação do modelo p-mediana corroborou a escolha de Manaus como uma das medianas ideais, tanto na análise simples quanto na ponderada pelo número de operações, destacando sua capacidade de atender eficientemente à demanda regional e de minimizar as distâncias entre os aeródromos demandantes. A criação de uma base aérea em Manaus não apenas atenderia



ao volume significativo de operações logísticas e de defesa nessa área, mas também ampliaria a capacidade de pronta-resposta às emergências, consolidando a presença estratégica da FAB em uma região essencial para a soberania e segurança do território brasileiro.

Os resultados obtidos por este estudo corroboram os achados de Caetano *et al.* (2022), ao enfatizar a necessidade de identificar uma boa localização para o aeródromo como critério para políticas de investimento. O modelo apresentado poderia ser ainda mais enriquecido, sendo ponderado pelo número de habitantes, de modo a distância a ser minimizada fosse a de deslocamento da população até o aeródromo, em vez de se restringir apenas à distância entre o aeródromo demandante e a facilidade. Além disso, contribui para o estudo de Silva (2019), que, ao aplicar o algoritmo para a definição das bases de resgate, poderia utilizar este modelo na segunda etapa, ponderando pelo número de emergências em cada localidade para a definição de novas bases, aproximando-as das áreas com maior demanda.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo aplicou o modelo de programação linear p-mediana para determinar a melhor localização de bases aéreas para as novas aeronaves KC-390, utilizando as bases existentes da FAB como referência. A análise considerou variáveis críticas, como a quantidade de decolagens e as distâncias percorridas, permitindo uma otimização robusta que alinha teoria e prática operacional. A aplicação do modelo indicou consistentemente SBMN como uma das medianas ideais, tanto na análise simples quanto na ponderada, confirmando sua adequação para minimizar distâncias e otimizar a eficiência operacional.

A implementação de uma base dedicada em Manaus para o KC-390 fortaleceria a capacidade de resposta da Força Aérea Brasileira. A escolha das bases otimizadas reflete a necessidade de posicionar estrategicamente as aeronaves para responder rapidamente a demandas logísticas e operacionais, melhorando a prontidão e eficiência da FAB. O estudo fornece embasamento científico para auxílio à tomada de decisões estratégicas nas Forças Armadas, contribuindo para a gestão logística militar e a alocação eficiente de recursos, entendendo que não esgota o assunto, pois decisões estratégicas são multifacetadas. Estudos futuros podem aplicar o modelo considerando a especificidade de missões executadas por cada aeronave, e extrapolar para outras aeronaves da frota.

Ricardo Alexandre Fachiano Junior

<https://orcid.org/0009-0002-3150-0115>

<http://lattes.cnpq.br/5171348471857016>

rrfachiano@gmail.com

Possui Graduação em Ciências Aeronáuticas e em Administração Pública pela Academia da Força Aérea, AFA (2019) e especialização em Análise Operacional pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA (2024).



Mauro Caetano

<https://orcid.org/0000-0002-5978-1054>

<http://lattes.cnpq.br/1377101375497344>

caetano@ita.br

Possui Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade de São Paulo, USP (2010), e Pós-Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA (2016).

Joyce Carolynne de Melo Silvestre

<https://orcid.org/0000-0003-0081-0524>

<http://lattes.cnpq.br/2077436813648300>

joy.silvestre14@gmail.com

Possui graduação em Engenharia Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA (2014) e Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo mesmo instituto (2021).

Contribuições dos autores:

O autor Ricardo Alexandre Fachiano Junior realizou a pesquisa, aplicou o método, desenvolveu a análise dos resultados e elaborou a versão inicial do artigo. O autor Mauro Caetano foi responsável pela orientação e planejamento da execução das atividades de pesquisa, bem como trabalhou na versão final do texto. A autora Joyce Carolynne de Melo Silvestre foi responsável pela revisão e preparação da versão final do artigo.

Como citar este artigo:

ABNT

FACHIANO JUNIOR, R.A.; CAETANO, M.; SILVESTRE, J. C. M. Identificação de bases aéreas para operação das aeronaves KC-390 utilizando o modelo p-mediana. **Revista da UNIFA**, Rio de Janeiro, v. 38, p. 1-20, 2025.

APA

FACHIANO JUNIOR, R.A.; CAETANO, M.; SILVESTRE, J. C. M. (julho, 2025). Identificação de bases aéreas para operação das aeronaves KC-390 utilizando o modelo p-mediana. **Revista da UNIFA**, 38 (1), P. 1-20.



REFERÊNCIAS

- BALLOU, R. H. The accuracy in estimating truck class rates for logistical planning. **Transportation Research Part A: General**, v. 25 (6), pp. 327- 337, 1991. [https://doi.org/10.1016/0191-2607\(91\)90011-E](https://doi.org/10.1016/0191-2607(91)90011-E)
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. Portaria nº 88 /7SC1, de 12 de setembro de 2023. Aprova a reedição da Diretriz que dispõe sobre a implantação da aeronave KC390 na Força Aérea Brasileira. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 178, f. 23, 27 set. 2023.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. Portaria nº 2.102/GC3, de 18 de dezembro de 2018. Aprova a reedição do Plano Estratégico Militar da Aeronáutica. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 222, f. 23, 20 dez. 2018.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **Força Aérea Brasileira**: FAB se despede da aeronave C-130 com uma série de homenagens. Brasília, DF, 2024a. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/42216>. Acesso em: 7 mai. 2024.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **Força Aérea Brasileira**: KC-390 Millennium alcança marca de 10 mil horas de voo. Brasília, DF, 2024b. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/41568/>. Acesso em: 3 mai. 2024.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **Força Aérea Brasileira**: Museu Aeroespacial. C-130H Hércules Lockheed Aircraft Corporation. Brasília, DF, 2024c. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/musal/index.php/aeronaves-em-exposicao/55-avioes/391-c-130>. Acesso em: 5 mai. 2024.
- CAETANO, M.; SILVA, E. J.; VIEIRA, D. J.; ALVES, C. J. P.; MÜLLER, C. (2022). Criteria prioritization for investment policies in General Aviation aerodromes. **Regional Science Policy & Practice**, 14(6), 211– 233, 2022. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12538>
- COMAE. Comando de Operações Aeroespaciais. **Dados operacionais**. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/organizacoes/mostra/455/>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- COMPREP, **Unidades Aéreas**. Disponível em: <http://www.comprep.intraer/index.php/unidades>. Acesso em: 09 jul. de 2024.
- CROCI, D.; JABALI, O.; MALUCELLI, F. The balanced p-median problem with unitary demand. **Computers & Operations Research**, v. 155, p. 106242, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106242>.
- DASKIN, M. S. Network and Discrete Location: **Models, Algorithms, and Applications**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- HAKIMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. **Operations Research**, v. 12, n. 3, p. 450–459.1964.



LAPORTE, G.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. **Location Science**. Springer, 2015.

PIZZOLATO, N. D.; RAUPP, F. M. P.; SOTOMAYOR ALZAMORA, G. Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da p-mediana e suas variantes. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v.4, n.1, p. 13-42, 2012.

REVELLE, C. S.; SWAIN, R. W. Central facilities location. **Geographical Analysis**, 2(1), 30-42, 1970. Disponível em: <https://doi/10.1111/j.1538-4632.1970.tb00142.x>.

SILVA, D. C. A.; MESTRIA, M. **Solução do problema da p-mediana para localização de estações de serviço utilizando metaheurística Chemical Reaction Optimization**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 49, 2017. Blumenau: SBPO, 2017. Disponível em: <https://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2017/pdf/168507.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2024.

SILVA, M. R. **Aplicação de algoritmo estocástico na solução do problema das p-medianas para localização de Bases de resgate aéreo**. XIX Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/spolm>. Acesso em: 5 jul. 2024.

TUKEY, J. W. **Exploratory Data Analysis**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.

Recebido: 10 set 2024

Aceito: 06 mar 2025

