



MODELAGEM PARA SELEÇÃO DE LOCALIZAÇÃO USANDO MODELO DE SOMA PONDERADA

André Luiz Barbosa Arantes dos Santos¹, Gustavo Valentim Loch²

^{1,2} Programa de Pós-graduação em Gestão de Operações, Liderança e Decisão, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
(druida.andre@gmail.com.br)

Resumo: Este trabalho desenvolve e aplica um framework quantitativo baseado no Modelo de Soma Ponderada (WSM), um método multicritério (MCDM), para seleção de localização de um site produtivo no Brasil. Integrando critérios logísticos, de custo, capital humano e fatores socioeconômicos (IBGE e OpenStreetMap), o modelo avaliou as Regiões Geográficas Intermediárias. Os resultados demonstram trade-offs entre polos metropolitanos e regiões de menor custo, com São Paulo liderando o ranking.

Palavras-chave: Tomada de Decisão; Localização de Sites; Métodos Multicritério; Modelo de Soma Ponderada

INTRODUÇÃO

A seleção da localização para a instalação de um novo site produtivo representa uma decisão estratégica de alta relevância no planejamento operacional e na configuração das cadeias de suprimentos (Owen e Daskin, 1998; Sharma et al., 2024). Tal decisão envolve compromissos financeiros e operacionais de longo prazo, incluindo custos de aquisição de terrenos, construção de instalações, desenvolvimento logístico e treinamento de mão de obra (Sharma et al., 2024).

Como enfatizado por Flyvbjerg e Gardner (2023), decisões mal calculadas nesse processo podem gerar elevados custos de reestruturação e duplicidade de esforços caso se faça necessária uma futura realocação em resposta a mudanças ambientais ou estratégicas.

Na literatura especializada em Pesquisa Operacional, o problema de localização de instalações é tradicionalmente abordado por dois caminhos metodológicos principais: modelos de otimização matemática em espaços contínuos ou amplos, e Métodos de Decisão Multicritério (MCDM — Multi-Criteria Decision-Making), focados no ranqueamento e na seleção entre um conjunto discreto de alternativas predefinidas (Kumar et al., 2017; Owen e Daskin, 1998).

A abordagem MCDM se destaca por permitir a estruturação e a integração de variáveis conflitantes de natureza quantitativa e qualitativa, tais como custos, proximidade de recursos, infraestrutura, condições logísticas e fatores sociais (Abdel-Basset

et al., 2021; Amjad et al., 2021; Dehshiri e Firoozabadi, 2022; Di Grazia e Tina, 2023).

Entre as diversas técnicas multicritério consolidadas — como o Processo Analítico Hierárquico (AHP), PROMETHEE-II e VIKOR —, o Modelo de Soma Ponderada (WSM — Weighted Sum Model) evidencia-se pela sua clareza operacional, simplicidade de aplicação e capacidade de representar de forma transparente as prioridades estratégicas organizacionais mediante a atribuição de pesos aos critérios avaliados (Hwang e Yoon, 1981; Zavadskas et al., 2012).

Contudo, nota-se uma lacuna na literatura quanto à aplicação direta do WSM para a avaliação consolidada de sites produtivos em escala regional no Brasil, articulando dados demográficos, sociais e logísticos de forma sistêmica.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver e aplicar um framework quantitativo baseado no Modelo de Soma Ponderada (WSM) para avaliar e selecionar a localização de um site produtivo no Brasil.

A modelagem integra critérios estratégicos e socioeconômicos — incluindo eficiência logística, disponibilidade de mão de obra qualificada, custos salariais, população e o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) —, utilizando dados públicos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e malhas viárias do OpenStreetMap (OSM) analisadas nas Regiões Geográficas Intermediárias do país. Busca-se, assim, fornecer uma ferramenta quantitativa e orientadora que quantifique trade-offs



estratégicos e supere abordagens puramente qualitativas na tomada de decisão gerencial.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo adota caráter quantitativo e modelagem analítica voltada à tomada de decisão estratégica para a localização de instalações produtivas no contexto da rede urbana brasileira. Como escopo territorial, adotou-se a divisão oficial em 133 Regiões Geográficas Intermediárias (RGIs) instituída pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), as quais articulam centros urbanos regionais e redes de mobilidade econômica. Para apoiar o processo decisório, utilizou-se o Método da Soma Ponderada (WSM — Weighted Sum Model), consolidado na literatura de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM). A avaliação das RGIs considerou um conjunto de cinco variáveis estratégicas, quantificadas a partir de fontes oficiais públicas e computacionais:

- Eficiência Logística (D_i): Mensurada pela soma das distâncias ponderadas pelas demandas regionais ($Km \times Demanda$), calculadas a partir das rotas viárias do OpenStreetMap (OSM) via script em Python usando os centroides das RGIs.
- Disponibilidade de Mão de Obra Qualificada (MO_i): Indicador educacional e censitário quantificado pela proporção da população local com mínimo de 12 anos de estudo (IBGE)
- Custo Operacional de Mão de Obra (C_i): Representado pelo rendimento médio local (IBGE). No modelo, comporta-se como um critério de custo a ser minimizado.
- Índice de Desenvolvimento Humano (IDH_i): Indicador sintético das condições sociais, saúde e qualidade de vida regional (IBGE).
- População da RGI (P_i): Métrica demográfica para mensuração da escala da força de trabalho geral e do mercado consumidor (IBGE, 2017).

Devido à multidimensionalidade das variáveis e às suas diferentes unidades de medida, aplicou-se a normalização linear da matriz de decisão (Hwang e Yoon, 1981). Para critérios de benefício (em que maiores valores são preferíveis, como MO_i , IDH_i e P_i), o valor normalizado (r_{ij}) foi obtido por:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})}$$

Para os critérios de custo (em que menores valores representam melhor desempenho, como os custos salariais em C_i e distâncias em D_i), a normalização foi calculada por:

$$r_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}}$$

Após a padronização das métricas em escalas adimensionais de 0 a 1, atribuiu-se um vetor de pesos de importância (w_j) baseado na priorização estratégica de fatores logísticos e econômicos na literatura (Dehshiri e Firoozabadi, 2022; Sharma et al., 2024). A distribuição dos pesos estabeleceu: Eficiência Logística com 35% ($w_1 = 0,35$); Mão de Obra Qualificada com 25% ($w_2 = 0,25$); Rendimento Médio/Custo com 20% ($w_3 = 0,2$); IDH com 10% ($w_4 = 0,10$); e População com 10% ($w_5 = 0,10$). A pontuação de preferência global (Q_i) para cada alternativa regional foi agregada mediante a Equação (1) (Zavadskas et al., 2012):

$$Q_i = \sum_{j=1}^n w_i * r_{ij} \quad (1)$$

Onde a alternativa com o valor de Q_i mais próximo de 1,0 representa a localização mais satisfatória no cenário base. Posteriormente, foi estruturada uma análise de sensibilidade modificando o vetor de ponderação (priorizando o Custo de Mão de Obra em 35% e a Logística em 25%) para verificar a robustez das escolhas no modelo compensatório.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do Método da Soma Ponderada (WSM) permitiu estabelecer uma classificação das Regiões Geográficas Intermediárias (RGIs) quanto à aptidão para receber novas instalações produtivas no cenário base. A Tabela 1 sintetiza o desempenho das 10 localidades mais bem ranqueadas, detalhando suas notas normalizadas em cada critério e o índice final ponderado (Q_i).

Tabela 1. Classificação das 10 Regiões Geográficas Intermediárias com melhor pontuação no cenário base.

UF	Município Polo	Nota Final
São Paulo	São Paulo	0,872
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	0,696
Minas Gerais	Belo Horizonte	0,666
Bahia	Salvador	0,638
São Paulo	Campinas	0,631
Bahia	Vitória da Conquista	0,619
Bahia	Guanambi	0,610
Bahia	Ilhéus	0,608

Bahia	Barreiras	0,604
Bahia	Feira de Santana	0,604

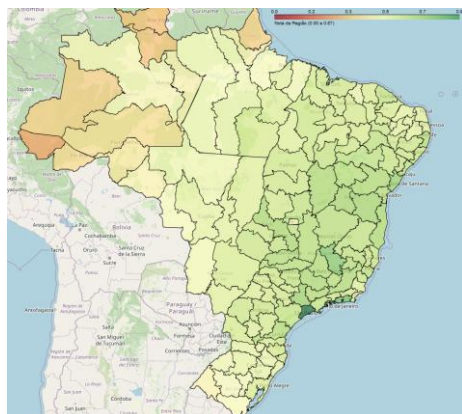


Figura 1. Distribuição espacial das notas finais (Q_i) das Regiões Geográficas Intermediárias no cenário base.

Conforme evidenciado na Tabela 1 e ilustrado na Figura 1, a Região Intermediária de São Paulo obteve a nota final mais elevada (0,872), distanciando-se significativamente das demais localidades. Esse resultado é decorrente do seu desempenho superior nos critérios com maior peso ponderal no modelo, especificamente a disponibilidade de mão de obra qualificada e a eficiência logística. Embora esta localidade apresente como desvantagem competitiva um custo salarial mais elevado em comparação com outras regiões, a natureza aditiva e compensatória do WSM assegura que a excelência combinada em capital humano e infraestrutura de transportes supere as fragilidades de custos diretos (Hwang e Yoon, 1981; Zavadskas et al., 2012). As pontuações finais alcançadas pelo Rio de Janeiro (0,696) e por Belo Horizonte (0,666), na segunda e terceira posições, ilustram o conceito de trade-off estrutural inerente aos problemas de localização (Sharma et al., 2024). A análise detalhada da composição da nota de Belo Horizonte indica que, embora a região atinja a melhor avaliação na minimização das distâncias logísticas globais, o seu índice final (Q_i) é contrabalanceado por indicadores inferiores de escala populacional e qualificação técnica em relação aos dois primeiros colocados. Esse comportamento corrobora a literatura de decisão multicritério ao demonstrar que a primazia isolada em um critério, ainda que de alta prioridade, é insuficiente para dominar um modelo de compensação integral (Cheng et al., 2023). Outro padrão evidenciado pelas pontuações finais é a presença de cinco regiões intermediárias do estado da Bahia no top 10 (Salvador, Vitória da Conquista, Guanambi, Ilhéus, Barreiras e Feira de Santana), com notas finais

variando entre 0,638 e 0,604. O elemento impulsionador dessas localidades na consolidação do índice foi a obtenção de notas máximas no critério de rendimento médio, apontando custos salariais altamente competitivos. Essa dualidade de pontuações explicita o dilema gerencial entre optar por metrópoles consolidadas — de alto índice de capital humano e infraestrutura, porém onerosas — e polos regionais de baixo custo operacional direto, mas com limitações demográficas e educacionais (Cobos-Mora et al., 2023; Sharma et al., 2024).

Análise de Sensibilidade

Para testar a robustez do modelo e a estabilidade das notas finais diante de alterações estratégicas, aplicou-se um novo vetor de pesos voltado à minimização de custos operacionais e salariais: Rendimento Médio (35%), Eficiência Logística (25%), Mão de Obra Qualificada (20%), IDH (10%) e População (10%). A Tabela 2 e a Figura 2 expressam as novas pontuações consolidadas sob essa redefinição de prioridades.

Tabela 2. Classificação das 10 Regiões Geográficas Intermediárias na Análise de Sensibilidade (foco em custos).

UF	Município Polo	Nota Final
São Paulo	São Paulo	0,787
Bahia	Salvador	0,696
Bahia	Vitória da Conquista	0,674
Bahia	Ilhéus	0,667
Bahia	Guanambi	0,665
Bahia	Feira de Santana	0,665
Bahia	Barreiras	0,662
Minas Gerais	Belo Horizonte	0,660
Pernambuco	Recife	0,654
Bahia	Santo Antônio de Jesus	0,653

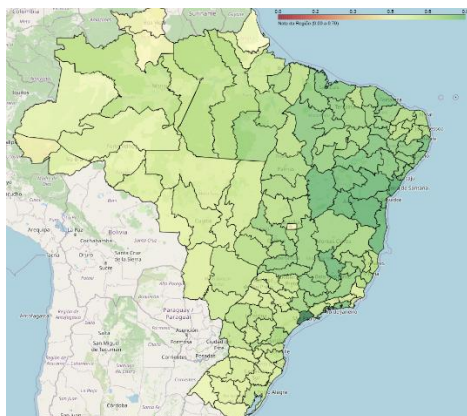


Figura 2. Distribuição espacial das notas finais (Q_i) no cenário da Análise de Sensibilidade.

A principal consequência visualizada nas pontuações da Tabela 2 foi a ascensão generalizada de polos focados em baixo custo da força de trabalho. Oito dos dez primeiros colocados concentram-se no estado da Bahia, com Salvador elevando sua nota final para 0,696 e assumindo a vice-liderança geral, um salto justificado pela ampliação do peso (para 35%) atribuído à variável salarial na qual a região possui desempenho máximo. Apesar dessa reestruturação dramática no bloco intermediário do ranqueamento, nota-se que a Região Intermediária de São Paulo sofreu uma redução na sua nota final (passando de 0,872 para 0,787), mas manteve a liderança isolada do estudo. Essa estabilidade comprova que, mesmo sob forte penalização no critério de custo salarial agora priorizado, o acúmulo de notas máximas em capital humano e escala demográfica, aliado à robustez logística, confere à metrópole paulista a condição de solução de compromisso de resiliência ímpar em problemas de localização multicritério (Cheng et al., 2023; Hwang e Yoon, 1981).

CONCLUSÃO

O presente estudo desenvolveu e aplicou com êxito um framework quantitativo para a seleção de localização de sites produtivos no Brasil, estruturado sob o Modelo de Soma Ponderada (WSM). A integração de variáveis socioeconômicas e educacionais do IBGE com métricas de rotas logísticas processadas via malha viária do OpenStreetMap permitiu superar abordagens puramente qualitativas ou empíricas, convertendo prioridades estratégicas organizacionais em uma avaliação sistemática sobre 133 Regiões Geográficas Intermediárias (RGIs). De forma objetiva, as principais conclusões obtidas pelo trabalho evidenciam que:

- Existência de perfis distintos de localização e trade-offs: A modelagem demonstrou a polarização entre dois grandes perfis de polos atrativos. De um lado, metrópoles

consolidadas que oferecem infraestrutura logística superior e alta oferta de capital humano qualificado, mas exigem custos salariais operacionais elevados. De outro, polos regionais — notadamente expressos pelo desempenho das regiões na Bahia — que garantem custos diretos de força de trabalho altamente competitivos, mas impõem restrições de infraestrutura demográfica e técnica.

- Robustez da liderança metropolitana: A Região Geográfica Intermediária de São Paulo (3501) consolidou-se na liderança global do estudo, obtendo a nota final mais alta tanto no cenário base (0,872) quanto na análise de sensibilidade com foco em custos (0,787). Esse comportamento demonstra que um desempenho combinatoriamente superior em múltiplos critérios vitais (como qualificação profissional e malha logística) configura uma solução de compromisso de alta resiliência, capaz de absorver a desvantagem de custos salariais mais onerosos.
- Contribuição gerencial: O modelo WSM provou ser uma ferramenta transparente e eficaz, oferecendo aos gestores a capacidade de quantificar concessões estratégicas e alinhar a expansão do footprint produtivo com o planejamento de longo prazo da organização.

Como limitações, ressalta-se que as variáveis analisadas funcionam como representações (proxies) de dinâmicas regionais complexas e não abrangem incentivos fiscais, regulamentações ambientais ou especificidades geológicas de terrenos. Para futuros trabalhos, recomenda-se a expansão do vetor de critérios do modelo e a sua verificação comparativa com outras técnicas multicritério de classificação não-linear (como TOPSIS, VIKOR ou PROMETHEE), bem como a sua integração a metaheurísticas de otimização combinatória, visando o refinamento contínuo do planejamento de redes de suprimentos.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Programa de Pós-graduação em Gestão de Operações, Liderança e Decisão (PPGOLD) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo suporte institucional e acadêmico, e ao Prof. Dr. Gustavo Valentim Loch pela orientação e supervisão técnica na condução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABDEL-BASSET, M. et al. A new hybrid multi-criteria decision-making approach for location



selection of sustainable offshore wind energy stations: A case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 280, p. 124462, 2021.

AMJAD, F. et al. Site location and allocation decision for onshore wind farms, using spatial multi-criteria analysis and density-based clustering: A techno-economic-environmental assessment, Ghana. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 47, p. 101503, 2021.

CHENG, X. et al. A study on site selection of pumped storage power plants based on C-OWA-AHP and VIKOR-GRA: A case study in China. *Journal of Energy Storage*, v. 72, p. 108623, 2023.

COBOS-MORA, S. L.; GUAMÁN-AUCAPIÑA, J.; ZÚÑIGA-RUIZ, J. Suitable site selection for transfer stations in a solid waste management system using analytical hierarchy process as a multi-criteria decision analysis: a case study in Azuay-Ecuador. *Environment, Development and Sustainability*, v. 25, p. 1944–1977, 2023.

DEHSHIRI, S. S. H.; FIROOZABADI, B. A new application of measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS) in solar site location for electricity and hydrogen production: A case study in the southern climate of Iran. *Energy*, v. 261, p. 125376, 2022.

DI GRAZIA, S.; TINA, G. M. Optimal site selection for floating photovoltaic systems based on Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA): a case study. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 43, n. 1, 2023.

FLYVBJERG, B.; GARDNER, D. Como fazer grandes coisas. Citadel Editora, São Paulo, 2023.

HWANG, C. L.; YOON, K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer, Berlin, 1981.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017. IBGE, Rio de Janeiro, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Síntese de Indicadores Sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira. IBGE, Rio de Janeiro, 2023.

KUMAR, A. et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 69, p. 596-609, 2017.

OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, v. 111, n. 3, p. 423-447, 1998.

SHARMA, P. et al. Strategic insights in manufacturing site selection: a multi-method approach using factor rating, analytic hierarchy process, and best worst method. *Frontiers in Mechanical Engineering*, v. 10, p. 1392543, 2024.

ZAVADSKAS, E. K. et al. Optimization of Weighted Aggregated Sum Product Assessment. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, v. 122, n. 6, p. 3-6, 2012.