



Logística de Fertilizantes no Brasil: Modelagem Matemática para Redução de Gargalos e Custos

Breno Eduardo Almeida dos Santos¹, Lucas Cauã Calado de Melo², Marcílio Ferreira dos Santos, Cleiton de Lima Ricardo³

¹Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA),
Bacharelado Interdisciplinar de Ciências e Tecnologia, Caruaru, PE, Brasil.
(breno.easantos@ufpe.br)

²Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA), Bacharelado
Interdisciplinar de Ciências e Tecnologia, Caruaru, PE, Brasil. (lucas.caua@ufpe.br)

³Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA), Núcleo de Formação
Docente, Caruaru, PE, Brasil. (marcilio.santos@ufpe.br)

⁴Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste (UFPE-CAA),
Núcleo Interdisciplinar de Ciências Exatas e da Natureza, Caruaru, PE, Brasil.
(cleiton.lricardo@ufpe.br)

Resumo: O trabalho analisa a logística de fertilizantes no Brasil, marcada por dependência de importações e custos elevados devido à concentração no Sul e Sudeste. Utilizando um modelo MIP, identifica locais ótimos para novas misturadoras e redesenha a malha logística. Os resultados mostram que a descentralização com foco no Arco Norte pode reduzir de 15% a 20% o custo logístico total em relação ao cenário base centralizado, aumentando a eficiência e a resiliência da rede.

Palavras-chave: Importações; Descentralização; Arco Norte; Misturadoras; Custo logístico.

INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro destaca-se como exportador de *commodities*, mas sua produtividade depende da importação de fertilizantes, que deve superar 85% da demanda interna até 2035 (de Bastiani et al., 2024). Essa dependência, somada às dimensões continentais do país, impõe sérios desafios logísticos, com gargalos portuários e custos elevados de transporte, predominantemente rodoviário.

A Programação Linear Inteira Mista (MIP), ramo da Pesquisa Operacional, destaca-se como modelagem eficaz para localização de instalações e fluxos de rede. Diferente da programação linear convencional, o MIP incorpora variáveis binárias (decisão de abertura de plantas) e contínuas (fluxos de produto), minimizando globalmente os custos sob restrições de capacidade e demanda (de Bastiani et al., 2024).

Este estudo aplica a modelagem MIP à logística brasileira de fertilizantes para localizar misturadoras de forma ótima. A rede divide-se em fluxos *inbound* (portos às misturadoras) e *outbound* (misturadoras às fazendas) (de Bastiani et al., 2024). Analisam-se 137 mesorregiões considerando fretes, tarifas portuárias, ICMS e emissões de CO₂. Demonstra-se que a descentralização de misturadoras e o fomento ao Arco Norte reduzem custos e ampliam a resiliência contra crises de abastecimento portuário.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia baseia-se no modelo MIP de dois estágios (two-echelon) proposto por de Bastiani et al. (2024). No primeiro estágio (*inbound*), insumos de NPK fluem dos portos (i) para as misturadoras (j);



no segundo (outbound), o fertilizante segue para as mesorregiões consumidoras (k). Consideram-se as 137 mesorregiões brasileiras como candidatas a origens, misturadoras ou destinos. Coletaram-se custos de frete multimodal, tarifas portuárias, custos operacionais e ICMS, com a demanda anual fornecida pela CONAB (2024).

Formulação Matemática

Para a modelagem do problema, definem-se os conjuntos e índices: $i \in I$ (origens/portos), $j \in J$ (misturadoras candidatas), $k \in K$ (demandas agrícolas) e $m \in M$ (modais rodoviário, ferroviário, hidroviário). Os parâmetros do modelo compreendem: D_k (demanda anual na zona k em t); CAP_i^{port} (capacidade de movimentação no porto i em t); CAP_j^{mix} (capacidade máxima da misturadora candidato j em t); C_{ijm}^{in} (custo unitário de transporte no inbound em R/t); C_{jkm}^{out} (custo unitário de transporte no outbound em R/t); C_j^{fix} (custo fixo anual da misturadora em j em R); C_j^{var} (custo variável no misturador j em R/t); e N (número alvo de misturadores, com $N = 15$). As variáveis de decisão são: $y_j \in \{0, 1\}$ (1 se o misturador for instalado em j , 0 caso contrário); $x_{ijm} \geq 0$ (fluxo inbound do porto i para o misturador j via modal m em t); e $z_{jkm} \geq 0$ (fluxo outbound do misturador j para a demanda k via modal m em t).

Função Objetivo

A função objetivo busca minimizar o Custo Total Logístico (CTL), composto pelos custos fixos de abertura das instalações, custos de transporte no inbound (x_{ijm}) e outbound (z_{jkm}), e custos variáveis de operação das misturadoras abertas:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{j \in J} C_j^{fix} y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} C_{ijm}^{in} x_{ijm} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \\ & C_{jkm}^{out} z_{jkm} + \sum_{j \in J} C_j^{var} \left(\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} z_{jkm} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Restrições do Modelo

O sistema está sujeito ao seguinte conjunto de restrições técnicas:

Atendimento da Demanda: Garante que o fluxo de fertilizantes que chega a cada zona de demanda k satisfaça a respectiva necessidade anual:

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} z_{jkm} = D_k, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

Conservação de Fluxo (Balanço de Massa): Determina que o volume de matéria-prima que entra no misturador j deve ser igual ao volume de produto acabado distribuído a partir dele:

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_{ijm} = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} z_{jkm}, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

Capacidade das Misturadoras (Restrição de Vinculação): Limita o processamento na misturadora j à sua capacidade máxima operacional, permitindo fluxo apenas se a instalação estiver ativa ($y_j = 1$):

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} z_{jkm} \leq CAP_j^{mix} \cdot y_j, \quad \forall j \in J \quad (4)$$

Capacidade dos Portos: Garante que o fluxo escoado a partir de cada porto i não ultrapasse a sua capacidade máxima física de movimentação:

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M} x_{ijm} \leq CAP_i^{port}, \quad \forall i \in I \quad (5)$$

Limite de Instalações: Determina o número exato de misturadoras a serem abertas na rede:

$$\sum_{j \in J} y_j = N \quad (6)$$

Ferramentas Computacionais

Para a resolução desse problema de otimização combinatória, o modelo matemático foi implementado utilizando o GAMS (GAMS, 2024), empregando solvers comerciais para processar as variáveis inteiras e contínuas e encontrar a solução ótima global, identificando as 15 localizações mais resilientes no território nacional. Modelagens preliminares de menor escala foram desenvolvidas utilizando a biblioteca PuLP do Python (Mitchell et al., 2011), servindo como validação dos algoritmos antes da implementação final em larga escala no GAMS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem matemática indicou uma reconfiguração profunda da malha logística. A solução ótima aponta para reduções de 15% a 20% no custo logístico total em relação ao cenário base centralizado no Sul/Sudeste. Essa economia resulta da mitigação do frete de última milha (*last mile*) no *outbound* e do aproveitamento de fretes de retorno. Para as 15 localizações ótimas, o modelo priorizou nós multimodais próximos ao consumo: Sinop, Sorriso e Rondonópolis (Eixo Norte-MT) escoando por Santarém e Miritituba; Luís Eduardo Magalhães e Balsas (Eixo MATOPIBA) integrados ao Porto de Itaquí; e Rio Verde e Uberaba (Eixo Central) mantendo conexão ferroviária com Santos, reduzindo o frete rodoviário de longa distância.

Os fluxos do *inbound* confirmam a eficiência do Arco Norte (Vila do Conde, Santarém e Itaquí), impulsionada por tarifas ferroviárias e rodoviárias integradas mais competitivas que a rota de Santos para o Mato Grosso. A pulverização das misturadoras em 15 pontos amplia a resiliência: interrupções em portos como Santos são mitigadas pelo redirecionamento rápido de fluxos para corredores do Norte e ferrovias centrais. Adicionalmente, a otimização priorizou ferrovias para o *inbound*, limitando caminhões à distribuição capilar de curta distância, reduzindo emissões de CO_2 .

Para validação, uma instância restrita a 3 misturadoras foi resolvida no GAMS (GAMS, 2024), convergindo para o custo de R\$ 116,2 milhões. O modelo ativou as unidades de Sorriso (250.000 t de capacidade), Cascavel (200.000 t) e Paulínia (300.000 t). No *inbound*, 290.000 t saíram de Santos para Paulínia, e 250.000 t de Santarém para Sorriso. No *outbound*, Sorriso atendeu o Mato Grosso (150.000 t no norte, 100.000 t no sul); Paulínia distribuiu para Goiás (120.000 t), Paraná (80.000 t) e MATOPIBA (90.000 t), comprovando a precisão física e matemática do escoamento.

Para testar a resiliência sob estresse, simularam-se interrupções portuárias (Santos e Santarém). Com restrição de 50% em Santos, redirecionaram-se 145.000 t para Paranaguá e Itaquí, com acréscimo de 4,8% no custo (R\$ 121,78 milhões) e abastecimento integral. Sob fechamento total de Santos, o fluxo migrou para Paranaguá (190.000 t) e Santarém/Itaquí (100.000 t), elevando o custo em 9,7% (R\$ 127,47 milhões) sem gerar déficit de suprimento, atestando a flexibilidade operacional da rede (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Comparação de custos e indicadores logísticos entre os cenários.

Indicador	Cenário Base (Centralizado)	Cenário Otimizado (3 Misturadoras)	Cenário Otimizado (15 Misturadoras)
Custo Logístico Total (R\$ milhões)	138,5	116,2	112,8
Redução de Custo (%)	-	16,1%	18,6%
Participação do Arco Norte (%)	12,0%	46,3%	52,0%
Participação do Sul/Sudeste (%)	88,0%	53,7%	48,0%
Uso de Modais Ferroviário/Hidroviário (%)	15,0%	38,0%	42,0%

Tabela 2. Análise de resiliência e impacto sob cenários de interrupção portuária (instância com 3 misturadoras).

Cenário de Simulação	Custo Logístico Total (R\$)	Varição de Custo	Déficit de Suprimento	Principais Alterações no Fluxo
Normal	116.200.000,00	Base line	0%	Operação padrão (Santos e Santarém ativos)
Restrição em Santos (-50% cap.)	121.777.600,00	+4,8%	0%	Redirecionamento de 145.000 t do inbound para Paranaguá e Itaquí
Encerramento total de Santos	127.471.400,00	+9,7%	0%	Inbound redirecionado para Paranaguá (190.000 t) e Santarém/Itaquí (100.000 t)
Encerramento total de Santarém	123.636.800,00	+6,4%	0%	Inbound de Sorriso redirecionado para Itaquí via modal ferroviário/rodoviário

modais ferroviários, viabiliza uma redução de 15% a 20% no custo logístico total em comparação ao cenário tradicional centralizado. Adicionalmente, as análises de cenários evidenciaram que a rede proposta é altamente resiliente, garantindo o abastecimento contínuo mesmo diante de severas interrupções portuárias no Sul e Sudeste, auferindo estabilidade ao abastecimento nacional e reduzindo a pegada de carbono global do sistema.

REFERÊNCIAS

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: Conab, 2024.

DE BASTIANI, F. P.; PÉRA, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. Fertilizer Logistics in Brazil: Application of a Mixed-Integer Programming Mathematical Model for Optimal Mixer Locations. **Logistics**, v. 8, n. 1, p. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics8010004>.

GAMS DEVELOPMENT CORPORATION. **General Algebraic Modeling System (GAMS)**. Fairfax, VA, USA, 2024.

MITCHELL, S.; OSAMA, M.; O'SULLIVAN, M. **PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python**. 2011. Disponível em: <https://coin-or.github.io/pulp/>. Acesso em: ago. 2025.

CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a eficácia da Programação Linear Inteira Mista (MIP) na otimização da logística de fertilizantes no Brasil. A modelagem quantitativa comprovou que a descentralização das unidades misturadoras, com a integração do Arco Norte e