

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADO AO PROBLEMA DA CADEIA LOGÍSTICA DE PRODUÇÃO DE MILHO NO BRASIL

Palavras-chave: Programação Inteira Mista, Logística de Milho, Fronteira de Pareto

Matheus Queiroz Mota, IMECC - UNICAMP
Kelly Cristina Poldi, IMECC - UNICAMP

Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores de milho do mundo, com uma cadeia logística complexa que se estende do cultivo à distribuição para o mercado interno e portos de exportação, com destaque para a China. O planejamento desta rede precisa balancear fatores econômicos (custos de transporte, impostos) com preocupações ambientais (emissões de carbono). Este trabalho aborda um modelo de otimização linear inteira multiobjetivo para a cadeia de produção de milho, considerando a minimização do custo logístico total e do balanço líquido de CO₂ (emissão por transporte menos o sequestro por cultivo).

Metodologia

O problema da cadeia logística de produção de milho no Brasil, abordado neste trabalho, compreende seis etapas principais. Inicia-se com a seleção de áreas produtoras, onde as regiões são definidas e a produtividade é estimada a partir de dados históricos, retirados de [1],[3] e [2]. A segunda etapa envolve o transporte dos grãos das fazendas para silos localizados dentro do mesmo estado, para secagem e armazenamento.

A partir dos silos, ocorre a distribuição final para atender tanto a demanda interna quanto a externa (via portos). Para modelar a rede, o problema incorpora diversos parâmetros logísticos, como distâncias, custos de frete, tarifas, ICMS e capacidades de infraestrutura. As regras da operação são estabelecidas por meio de restrições matemáticas que estabelecem o fluxo, os limites de capacidade, o estoque e o atendimento da demanda.

O objetivo central é desenvolver um modelo de Programação Linear Inteira Misto com objetivos conflitantes: minimizar o custo total da cadeia e, simultaneamente, minimizar o balanço líquido de CO₂, que considera as emissões do transporte em contraponto ao sequestro de carbono gerado

pela área cultivada.

Formulação Matemática: O problema foi modelado como um Problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) multiobjetivo, baseado em parte no trabalho [4]. Os parâmetros do modelo incluem produtividade agrícola (α_{ets}), custos de transporte (γ_i), que consideram distância e impostos (ICMS), e taxas de emissão (τ) e sequestro de carbono (λ). As principais variáveis de decisão são a área a ser cultivada (P_{ets}), os fluxos transportados (W_{ejt} , Y_{jmt} , etc.) e o estoque (I_{jt}). As duas funções-objetivo a serem minimizadas são:

$$\min f_1 = \sum_{e,t,s} \gamma_1 P_{ets} + \sum_{e,j,t} \gamma_2 W_{ejt} d_{ej} + \sum_{j,m,t} \gamma_3 Y_{jmt} d_{jm} + \dots \quad (\text{Custo Total}) \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_{e,j,t} \tau W_{ejt} d_{ej} + \sum_{j,m,t} \tau Y_{jmt} d_{jm} + \dots - \sum_{e,t,s} \lambda P_{ets} \quad (\text{Balanço de CO}_2) \quad (2)$$

O modelo é sujeito a restrições de capacidade, demanda, estoque e conservação de fluxo. As principais são:

- **Capacidade dos silos:** $\sum_{e \in E} W_{ejt} \leq \delta_j B_{jt}, \quad \forall j \in J, t \in T$
- **Atendimento da demanda interna:** $\sum_{j \in J} Y_{jmt} = \sigma_{mt}, \quad \forall m \in M, t \in T$

As demais restrições, referentes à demanda em portos, ativação de silos, balanço de estoque, limite de área disponível e demanda externa, estarão presentes de forma detalhada no relatório final.

Abordagem de Resolução: O modelo foi implementado em Python, com auxílio das bibliotecas Pandas e NumPy para manipulação de dados e *PuLP* para modelagem. O conjunto de soluções eficientes (Frenteira de Pareto) foi gerado pelo método **AUGMECON2** [5], escolhido por sua eficiência em evitar iterações redundantes e garantir a obtenção de soluções de Pareto ótimas em problemas de programação inteira.

Resultados e Discussão

A aplicação do método gerou pontos da Frenteira de Pareto (Figura 1), onde podemos visualizar o *trade-off* entre os objetivos. A análise revela que a escolha dos portos de exportação é o principal fator de variação entre as diferentes soluções obtidas.

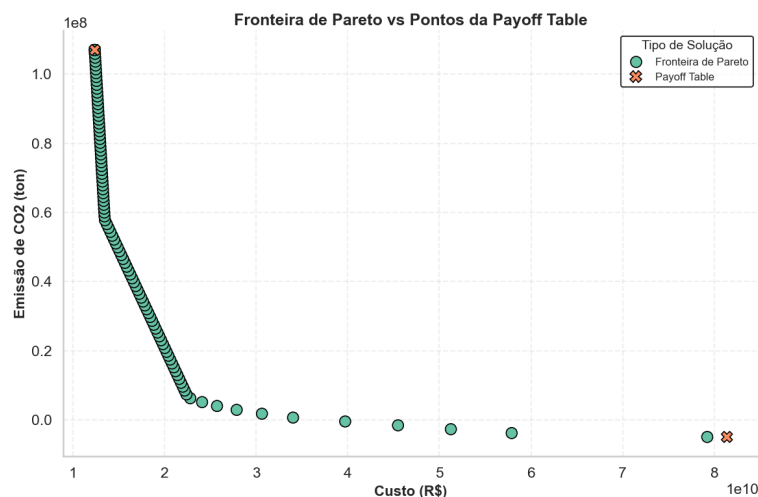


Figura 1: Fronteira de Pareto ilustrando o conflito entre custo e emissão de CO₂.

A análise interna da cadeia logística mostrou que as rotas de transporte entre produtores, silos e mercados internos, bem como a seleção das principais áreas de cultivo (concentradas em MG, MS e GO), permaneceram relativamente estáveis entre as diferentes soluções. A estratégia de estoque também seguiu um padrão, utilizando silos em localidades estratégicas, como Uberlândia-MG, como centros de armazenamento antes do envio para a exportação. Como esses fluxos internos foram consistentes, a análise a seguir foca na etapa de exportação, que apresentou as maiores variações.

Análise do Fluxo de Exportação: O comportamento do fluxo para os portos, ilustrado na Figura 2, reforça a dinâmica do trade-off e explica os cenários extremos da fronteira.

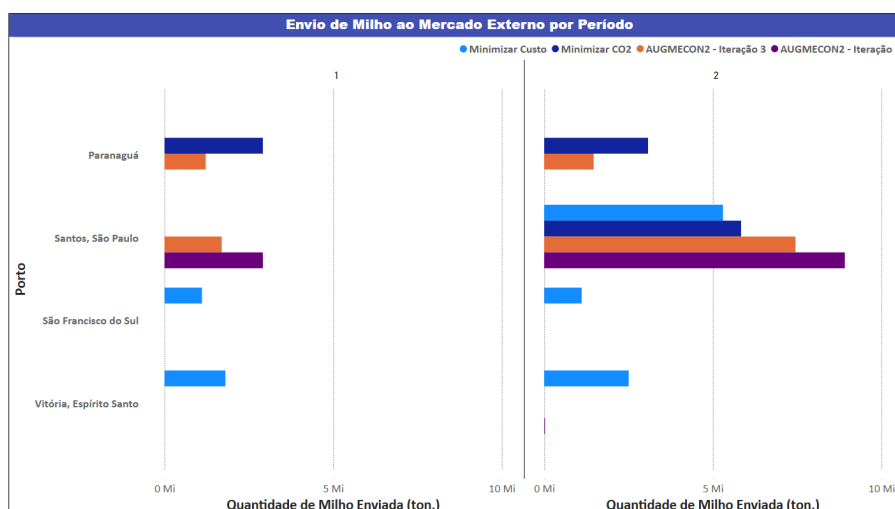


Figura 2: Envio de milho para o mercado externo a partir de cada porto por solução.

Na solução de custo mínimo (R\$ 82,4 bilhões), o modelo prioriza portos de baixo custo logístico, como Vitória-ES e São Francisco do Sul-SC, o que acarreta em altas emissões (52,2 milhões de

ton. de CO₂). Em contrapartida, na solução de CO₂ mínimo, o custo sobe para R\$ 100,6 bilhões, pois a carga é direcionada ao porto de Paranaguá-PR, que possui a menor taxa de emissão, mas os maiores custos. As soluções intermediárias encontradas pelo método encontram um equilíbrio, distribuindo a carga entre múltiplos portos, como Santos-SP e Paranaguá-PR, para moderar o custo sem sacrificar totalmente a performance ambiental.

Conclusão

Este estudo demonstrou que a otimização multiobjetivo é uma ferramenta poderosa para analisar a complexa cadeia do milho, identificando o trade-off entre custo e sustentabilidade. A principal conclusão é que a escolha estratégica dos portos de exportação é o fator decisivo para o desempenho econômico e ambiental da rede. A análise também apontou a necessidade de revisitar parâmetros-chave, como o custo de ativação de silos (que representou apenas 0,01% do custo total e pode estar subestimado) e a imprecisão de dados de emissão portuária. Para trabalhos futuros, sugere-se expandir o modelo para incluir outros modais de transporte, como ferrovias e hidrovias, a fim de encontrar novas e melhores soluções de equilíbrio.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do programa PIBIC/CNPq (cota 2024/2025).

Referências

- [1] Canal Rural. *Os reis da espiga: Veja os 15 municípios que mais produzem milho no Brasil*. 2024. URL: <https://www.canalrural.com.br/agricultura/os-reis-da-espiga-veja-os-15-municipios-que-mais-produzem-milho-no-brasil/> (acesso em 22/10/2024).
- [2] Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). *Visualização de Dados – Silos de Armazenagem no Brasil*. 2024. URL: <https://www.conab.gov.br/armazenagem> (acesso em 25/10/2024).
- [3] Compre Rural. *Brasil amplia dependência da China nas exportações de grãos*. 2024. URL: <https://www.comprerural.com/brasil-amplia-dependencia-da-china-nas-exportacoes-de-graos/> (acesso em 13/04/2025).

-
- [4] Angelo Aliano Filho, Cleber Damião Rocco e Reinaldo Morabito. “Bi-objective model for tactical planning in corn supply chain considering CO₂ balance”. Em: *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* 11.1 (2024), p. 2337442. DOI: 10.1080/23302674.2024.2337442.
- [5] George Mavrotas e Kostas Florios. *AUGMECON2: A novel version of the ε -constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems*. Laboratory of Industrial and Energy Economics, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens. 2013. URL: <https://www.gams.com/modlib/adddocs/epscmmip.pdf>.