

Otimização Multiobjetivo Aplicada ao Problema da Cadeia Logística de Milho no Brasil

Kelly C. Poldi¹ Matheus Q. Mota²
IMECC/UNICAMP, Campinas, SP

O Brasil é um dos maiores produtores de milho no mundo, e tal produção serve tanto para suprir a demanda interna quanto à demanda de mercados externos, de modo a movimentar bilhões de reais anualmente. Porém, o processo da cadeia logística de milho no Brasil é complexo, pois envolve diversos fatores, desde a decisão das localidades que serão utilizadas para a produção do milho, passando pelos silos que receberão o milho para realizar o processo de secagem, até a definição de quais rotas ou meios de transporte devem ser utilizados no transporte do milho, entre outros fatores geográficos e econômicos.

Outros fatores relevantes a serem considerados são os impactos ambientais advindos da cadeia logística de produção, tanto a emissão de CO₂ decorrente do transporte do milho aos silos ou mercados internos e externos quanto o gasto de água na produção e processamento do milho. Desse modo, como adotar uma abordagem que possa levar em conta a redução de custos na cadeia logística do milho bem como a diminuição dos impactos ambientais gerados por ela?

Neste contexto, uma ferramenta matemática pode nos auxiliar a resolver esse problema: a otimização matemática. Em especial, a otimização multiobjetivo.

Este trabalho propõe um modelo multiobjetivo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que, com base em [1], oferece uma nova perspectiva para o problema da cadeia logística do milho no Brasil. A formulação traz novas restrições, como: (i) limitação do número máximo de silos ativos por região; (ii) proibição de envio de milho para silos fora do estado de origem; e (iii) análise detalhada em nível municipal, em contraste com a abordagem estadual de [1].

O modelo proposto possui duas funções-objetivo. A primeira minimiza os custos logísticos da cadeia, abrangendo tarifas de frete interestaduais e intraestaduais, ICMS, ativação de silos e áreas de produção, plantio, estocagem e processamento dos grãos. A segunda função minimiza o balanço de CO₂, calculado como a diferença entre as emissões decorrentes do transporte e o sequestro proporcionado pela área cultivada.

Ademais, é feita uma análise para identificar padrões logísticos, tanto ao minimizar cada uma das funções individualmente quanto ao analisar as soluções do AUGMECON2 [3], como o uso repetido de determinadas rotas ou silos, além de entender quais partes da rede impactam cada função-objetivo. Por exemplo, ao detectar que os altos custos logísticos em determinadas soluções decorrem da contratação de um modal específico, pode-se considerar estratégias alternativas de transporte para reduzir gastos.

Dessa forma, além de propor avanços no modelo de [1], este trabalho utiliza ferramentas de análise de dados, como o *Power BI*, para explorar o comportamento das soluções de Pareto e apoiar o tomador de decisão na análise entre custo e sustentabilidade.

Adicionalmente, as restrições do problema consideram as limitações do processo de produção: número máximo de silos que podem ser ativados em um mesmo estado ou região em determinado período; área máxima de plantio a ser utilizada por cada produtor; e capacidade dos silos, bem

¹kelly@ime.unicamp.br

²m251495@dac.unicamp.br

como restrições ligadas à conservação de fluxo, baseadas em [5], entre produtor–silo, silo–mercado, entre outras.

Com base nas premissas estabelecidas, os dados necessários para a implementação computacional do modelo foram organizados a partir de diferentes fontes. As informações sobre demanda interna, impostos e fatores de emissão/sequestro de CO₂ foram extraídas de [1], enquanto dados sobre área disponível para cultivo e produtividade agrícola provêm de [2]. Já as localizações geográficas, capacidades e custos dos silos foram obtidas a partir de [4].

Além da coleta de dados, foi necessário realizar um processo de transformação de dados e o cálculo das distâncias entre os pontos da cadeia logística. Para isso, utilizamos uma API do *Google Maps*, implementada em Python, que, a partir das coordenadas geográficas (latitude e longitude) de cada localidade, retorna a distância rodoviária real entre elas.

Ademais, implementamos o modelo matemático no método AUGMECON2 [3], utilizando a biblioteca *open-source* PuLP, em Python, e o *solver* CBC. Para a estruturação dos vetores de entrada do modelo e a manipulação dos dados coletados, empregamos as bibliotecas NumPy e Pandas, garantindo eficiência no processamento e análise dos resultados.

Após realizados os experimentos computacionais, pudemos evidenciar a importância de uma análise multiobjetivo para encontrar o melhor equilíbrio entre reduzir custos e minimizar o balanço de CO₂. Observamos, pelos testes computacionais, uma diferença de mais de R\$ 18 bilhões entre a minimização individual de cada função, evidenciando o impacto econômico dessa escolha. Além disso, as soluções não apresentam um balanço de CO₂ negativo. Por fim, a solução obtida pelo método AUGMECON2 mostra um bom equilíbrio entre os extremos. Os resultados obtidos pela metodologia proposta serão detalhados na apresentação do trabalho, durante o evento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro PIBIC/CNPq.

Referências

- [1] A. Aliano Filho, C. D. Rocco e R. 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. URL: <https://doi.org/10.1080/23302674.2024.2337442>.
- [2] Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Informações Agropecuárias – Safras de Grãos**. 2024. URL: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> (acesso em 22/10/2024).
- [3] G. Mavrotas e K. Florios. “AUGMECON2: A novel version of the ε -constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems”. Em: **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>.
- [4] **Visualização de Dados – Silos de Armazenagem no Brasil**. 2024. URL: <https://www.conab.gov.br/armazenagem> (acesso em 25/10/2024).
- [5] M. Zuo, W. Kuo e K. L. McRoberts. “Application of Mathematical Programming to a Large-scale Agricultural Production and Distribution System”. Em: **Journal of the Operational Research Society** 42.8 (1991), pp. 639–648. DOI: 10.1057/jors.1991.130. eprint: <https://doi.org/10.1057/jors.1991.130>. URL: <https://doi.org/10.1057/jors.1991.130>.