UM MODELO LINEAR PARA PLANEJAMENTO TÁTICO NA AGROIDÚSTRIA DA SOJA

Mônica do Amaral
Universidade Federal de Ouro Preto
Rua Trinta e Seis, 115, Loanda, João Monlevade – MG
monica.amaral@ufop.edu.br

Reinaldo Morabito
Universidade Federal de São Carlos
Rodovia Washington Luís, km 235 – SP-310, São Carlos – SP
morabito@ufscar.br

RESUMO

Decisões táticas no complexo da soja, que envolvem o planejamento de operações de industrialização, estocagem e distribuição, são de grande importância para empresas atuantes no setor. A coordenação da sazonalidade da colheita da soja com as etapas de esmagamento e refino só é possível pelo uso adequado de estoques de matéria prima ao longo do ano. Dentre os principais produtos comercializados, além dos óleos de soja bruto e refinado, têm-se os farelos proteicos e o biodiesel, empregados nas indústrias alimentícia, de alimentação animal e como combustível renovável, respectivamente. Apresenta-se uma formulação de programação linear para o problema, considerando a minimização dos custos de produção, estoque, entrega em atraso e de transporte, considerando uma rede multimodal para o atendimento de demandas internas e de exportação. Testes preliminares foram realizados com instâncias baseadas com dados secundários e servem para verificar a coerência e ilustrar o potencial de análise do modelo.

PALAVRAS CHAVE: Planejamento tático, complexo agroindustrial da soja, programação linear.

Tópicos: Logística e Transportes, PO na Agricultura e Meio Ambiente.

ABSTRACT

Tactical decisions in the soybean complex, involving industrialization planning, storage and distribution, are important for companies operating in this sector. Coordinating soybean harvest seasonality and crushing and refining steps is only possible through the proper use of raw material stocks throughout the year. Main products in the complex, such as crude and refined soybean oil, protein bran and biodiesel, are used in food and animal feed industries, and as renewable fuel, respectively. A linear programming formulation for this problem is presented, considering minimization of production, inventory, late deliveries, and transport costs, in a multimodal network to meet internal and export demands. Preliminary tests performed using instances based on secondary data verify consistency and illustrate model potential analysis.

KEYWORDS: Tactical planning, soybean agri-food supply chain, linear programming.

Paper topics: Logistics and Transportation, PO in Agriculture and Environment.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

1. Introdução

Na safra de 2021/2022, a produção de soja no Brasil ultrapassou 124 milhões de toneladas, em uma área de plantio de mais de 40 milhões de hectares [CONAB, 2022]. Além de ser consumida *in natura*, a soja também é processada em diversos subprodutos, tais como os óleos comestíveis, farelo, substitutos de proteína animal, bebidas à base de soja, dentre outros [Carrão-Panizzi, 2013]. No entanto, o consumo de soja no Brasil, se comparado aos demais países do mundo, é pouco expressivo. Esse fato é ilustrado pela quantidade exportada em relação ao consumo interno, sendo que, na última safra, mais de 58% de toda a produção foi destinada à exportação.

Complexos agroindustriais, como no caso da soja, apresentam características intrínsecas que dificultam a sua gestão, tais como sazonalidade de oferta, alto grau de perecibilidade de matérias primas e legislação relacionada à qualidade e segurança alimentar [Ahumada e Villalobos, 2009]. Além disso, o Brasil é um país de grandes extensões territoriais, fazendo com que as plantações de soja se encontrem, muitas vezes, distantes das unidades processadoras de soja e dos mercados em que os produtos derivados são comercializados e consumidos. Sendo assim, em um contexto de médio prazo, em que as capacidades de processamento e armazenagem das fábricas estão definidas, o planejamento conjunto de atividades produtivas e logísticas pode se tornar bastante complexo. Especialmente quando há competição entre as demandas do mercado interno e de exportação, com possibilidade de obtenção de vantagens com o uso do transporte multimodal.

Nesse contexto, têm-se por objetivo, no presente trabalho, propor um modelo de programação linear para a cadeia agroindustrial da soja no Brasil. O trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2, apresenta-se uma breve revisão de literatura, citando alguns trabalhos de revisão sistemática relacionados à utilização de técnicas de Pesquisa Operacional na agroindústria e as pesquisas encontradas que estão relacionadas à modelagem do complexo da soja. Na Seção 3, o problema de planejamento tático na agroindústria brasileira da soja é apresentado e formulado matematicamente. Na Seção 4, são discutidos resultados preliminares obtidos com cenários baseados em dados secundários. Na Seção 5, encerra-se o trabalho, com algumas considerações a respeito da aplicabilidade do modelo, perspectivas em andamento e futuras.

2. Revisão de Literatura

Ahumada e Villalobos [2009] realizaram uma extensa revisão bibliográfica relativa a trabalhos de Pesquisa Operacional plicados em cadeias agroalimentares. Os trabalhos foram classificados de acordo com as abordagens de otimização utilizadas, o tipo de culturas modeladas e os horizontes de planejamento. Quanto às abordagens de otimização, os trabalhos foram classificados como de programação linear, programação linear inteira mista, programação dinâmica e programação estocástica. Em relação aos tipos de cultura, os produtos foram classificados como perecíveis, como no caso das hortaliças, e não perecíveis, como soja, milho, café e arroz. Os horizontes de planejamento levantados tratam de problemas envolvendo decisões ligadas aos níveis estratégico, tático e operacional. Como perspectivas de pesquisa, os autores citam a necessidade de planejamento conjunto entre os elos das cadeias agroalimentares.

Taşkiner e Bilgen [2021] realizaram uma nova revisão sistemática a respeito de estudos de cadeias produtivas agroalimentares. Os autores destacam as decisões de plantio, produção, distribuição e armazenagem, já tratadas por Ahumada e Villalobos [2009], acrescentando a colheita como uma decisão importante, pois possibilita uma melhor integração entre as operações. Os trabalhos analisados segundo a consideração de incertezas, janelas de tempo de entrega, perecibilidade dos produtos, limitações de recursos de produção, sustentabilidade, desperdícios ao longo da cadeia e quantidade de produtos no mesmo complexo. Os autores reforçam a necessidade de desenvolvimento de trabalhos que apoiam decisões integradas e a consideração de incertezas.

García-Flores et al. [2015] realizam uma revisão de modelos de otimização aplicados a cadeias alimentares, destacando algumas tendências, tais como variações de parâmetros e incertezas, objetivos relacionados à sustentabilidade, perecibilidade e tempo de prateleira, segurança e *recall* de produtos. Os autores fizeram um levantamento de literatura de modelos nas cadeias de carnes, peixes e distribuição urbana de alimentos. Como tendências para trabalhos futuros, os autores citam o *trade-off* entre entrega dos produtos e os custos relacionados.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

Jedermann et al. [2014] revisaram trabalhos relacionados à implementação de métodos de redução de desperdícios nas operações logísticas de distribuição de alimentos, uma vez que a população mundial tende a crescer, gerando a necessidade de maior consumo de alimentos. Os autores estudaram casos relacionados a frutas vermelhas, bananas e carne, buscando ferramentas eficientes de tratamento dos alimentos após as etapas de abate ou colheita. Apesar de serem produtos aparentemente diferentes, esses alimentos possuem características semelhantes, como o tempo de consumo e a necessidade métodos de transporte e conservação eficientes.

Além desses trabalhos relacionados a revisões sistemáticas, foram encontrados alguns trabalhos que tratam diretamente de abordagens de otimização do complexo da soja. A maioria dos trabalhos publicados tem enfoque em minimização de custos de transporte na rede. Em relação à distribuição de produtos e subprodutos da cadeia, Liu et al. [2017] buscam a minimização de custos de transporte multimodal, considerando rodovias, ferrovias, portos internos e oceânicos, além dos custos de transbordo. Um caso é apresentado e resolvido utilizando o *software* GAMS.

Guimarães et al. [2021] formulam um problema com o objetivo de minimizar os custos de transportar a soja dos pontos de produção para os locais de demanda, passando por terminais intermodais, cuja quantidade de terminais abertos também deve ser minimizada. Um caso é resolvido usando o *software* Xpress. Lopes et al. [2016] também desenvolveram um modelo com objetivo de minimização dos custos de transporte multimodal, considerando opções rodoviárias, ferroviárias e hidroviárias, interligadas por operações de transbordo, em uma rede de exportação da soja em grão. Oliveira et al. [2021] utilizaram um modelo de pares origem-destino para minimizar os custos de transporte das regiões produtoras de soja para os portos, para exportação.

Em contextos mais estratégicos, Amaral et al. [2012] propuseram um modelo de fluxos e localização de terminais intermodais para a rede de exportação de soja no Brasil, com objetivo de minimização dos custos de transporte e transbordo. Testes com instâncias realistas foram apresentados e analisados. Testes com instâncias geradas aleatoriamente foram realizados para comparar a complexidade computacional do modelo, considerando o desempenho dos *softwares* AMPL e GLPK.. Posteriormente, Almeida et al. [2016] utilizam o mesmo modelo para analisar cenários propostos para diferentes configurações de redes logísticas de exportação de soja, considerando os portos do Sudeste e Sul, a integração com a malha Norte e as possibilidades de integração, utilizando-se ferrovias que ainda estavam em projeto na época.

Alguns trabalhos tratam da maximização de lucros da cadeia de soja. Merener et al. [2016] desenvolveram um modelo para maximização de lucro da cadeia produtiva a partir do total de vendas planejadas e novas vendas, descontando custos de transporte, estoques e produção. Para resolver o problema, os autores utilizam um método heurístico, implementado em AMPL. Dubke e Pizzolato [2011] desenvolveram um modelo para maximizar os lucros da cadeia produtiva da soja, levando em consideração a abertura de terminais especializados e de serviços de processamento da soja e armazenagem nos portos brasileiros, deduzindo-se os custos associados ao transporte dos produtos e de produção dos subprodutos.

As abordagens multiobjetivo encontradas também se concentram na minimização de custos. Clott et al. [2015] desenvolvem um modelo multiobjetivo, que busca minimizar o número de contêineres movimentados de um país para outro, resolvendo o problema teste no *software* AMPL. Lopéz e Qassim [2017] formularam um modelo em que o primeiro objetivo é a minimização de custos para os investidores na estrutura logística e o segundo objetivo minimização de custos para os usuários da estrutura logística. Paksoy et al. [2012] utilizam lógica *fuzzy* em um modelo multiobjetivo, que busca minimizar os custos de transporte dos fornecedores para os silos de estocagem e dos fornecedores para as companhias produtoras.

3. Modelagem do Problema de Planejamento Tático no Complexo da Soja

O complexo da soja é formado por diversos produtos, sendo seis deles considerados no presente trabalho. A Figura 1 mostra a estrutura de produtos e processos utilizados, bem como a representação numérica utilizada na descrição do modelo. O processo de esmagamento produz simultaneamente o óleo bruto e o farelo de soja a partir da soja em grão. O óleo bruto pode ser comercializado ou passar por outros processos industriais, de refino ou transesterificação. O

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

primeiro desses processos gera o óleo refinado, enquanto o segundo tem como produto o biodiesel. O farelo de soja pode passar por um processo de enriquecimento de farelo e gerar a proteína concentrada de soja. Os dois tipos de farelo servem à indústria de alimentação animal.

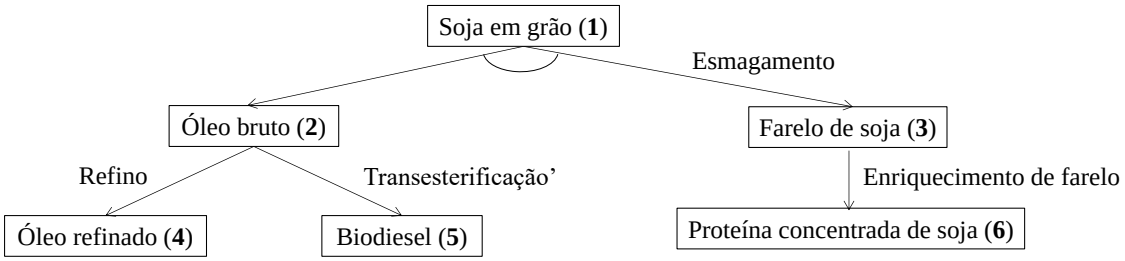


Figura 1: Estrutura de produtos e processos no complexo da soja

Esses processos ocorrem em uma rede, que pode ser representada por um grafo, como mostrado na Figura 2. Os vértices indicam diversos tipos de locais a serem considerados. As diferentes regiões de oferta, $i \in I$, produzem a soja em grão, que é enviada para unidades processadoras, representadas por $j \in J$. Os próximos elos da cadeia são as regiões de demanda no mercado interno, $k \in K$ e as regiões de demanda externa, $l \in L$. No abastecimento do mercado interno, o transporte é realizado por modal rodoviário, mas as rotas de exportação podem incluir trechos de ferrovias, de hidrovias, além de trechos marítimos, necessitando, para isso, utilizar pontos de transbordo multimodal, $m \in M$.

Os arcos da rede foram subdivididos, de acordo com os tipos de vértices envolvidos, os modais utilizados e a variedade dos produtos que fluem no grafo. Os arcos do conjunto $(i.j) \in A$ são arcos de transporte rodoviário, monoproduto, por onde flui a matéria prima, que é a soja em grão, das regiões de oferta i, para as unidades processadoras j. Os arcos do conjunto B compreendem arcos de transporte rodoviário, ou seja, arcos monomodais, porém utilizados para o transporte dos múltiplos produtos provenientes da cadeia. Esses arcos foram divididos em $(j,k) \in B_1$, que são os arcos que ligam as fábricas j e os pontos que representam os mercados internos k; os arcos $(j,l) \in B_2$, ligam as fábricas j e os portos m; e $(j,m) \in B_3$, que representam as rotas rodoviárias diretas entre as fábricas j e os pontos de transbordo m, que podem representar terminais rodo-ferroviários ou rodo-hidroviários. O conjunto $B = B_1 \cup B_2 \cup B_3$ é o conjunto de arcos rodoviários multiproduto, entre fábricas, clientes e terminais intermodais ou portos, para atendimento das demandas ou para a mudança de modal. Os arcos do conjunto C representam rotas multimodais. Os arcos $(m,m') \in C_1$ e $(k,m) \in C_2$, em que $C = C_1 \cup C_2$, são trechos de transporte ferroviário, hidroviário ou marítimo entre os terminais m e as regiões de demanda externa l.

O planejamento tático da cadeia é realizado em um horizonte de planejamento discretizado em períodos, $t \in T$, de forma a capturar a característica sazonal da oferta da soja, que é colhida em apenas alguns meses do ano. Os produtos foram subdivididos em conjuntos, de matérias primas, $P, P = \{\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{3}\}$ e subprodutos, $S, S = \{\mathbf{2}, \mathbf{3}, \mathbf{4}, \mathbf{5}, \mathbf{6}\}$. Um terceiro conjunto foi utilizado para definir os produtos provenientes dos processos de refino e transesterificação, que têm o óleo bruto como matéria prima, $G, G = \{\mathbf{4}, \mathbf{5}\}$. O parâmetro a_i^t representa a quantidade ofertada de soja em grão na região de oferta i no período t (toneladas), o parâmetro d_{sk}^t representa a quantidade demandada do subproduto s na região de demanda interna k no período t (toneladas) e D_{sl}^t é a quantidade demandada do subproduto s na região de demanda externa l no período t (toneladas).

Cada uma das fábricas apresenta características tecnológicas próprias, representadas por α_{sj}, que é o rendimento do produto industrializado s na fábrica j. Algumas fábricas podem produzir biodiesel e proteína concentrada de soja, mas nem todas as fábricas possuem processos de transesterificação e beneficiamento. Para indicar essas características, são utilizados parâmetros binários, ψ_j e μ_j para indicar se a fábrica j produz biodiesel e proteína concentrada de soja, respectivamente. A fábrica j possui uma capacidade v_{pj} de produção a partir da matéria prima p na unidade j (toneladas/mês) e λ_{gj} que representa as capacidades de produção do produto g na

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

unidade j a partir do óleo bruto (toneladas/mês). As capacidades estáticas de estocagem também são consideradas, sendo r_j a capacidade de estocagem para a soja em grão na unidade j (toneladas) e h_{sj} a capacidade de estoque para cada um dos subprodutos s fabricados na unidade j (toneladas). Também são consideradas capacidades de transbordo nos terminais intermodais e nos portos, descritas como taxas de transferência, u_m no terminal m (toneladas/mês).

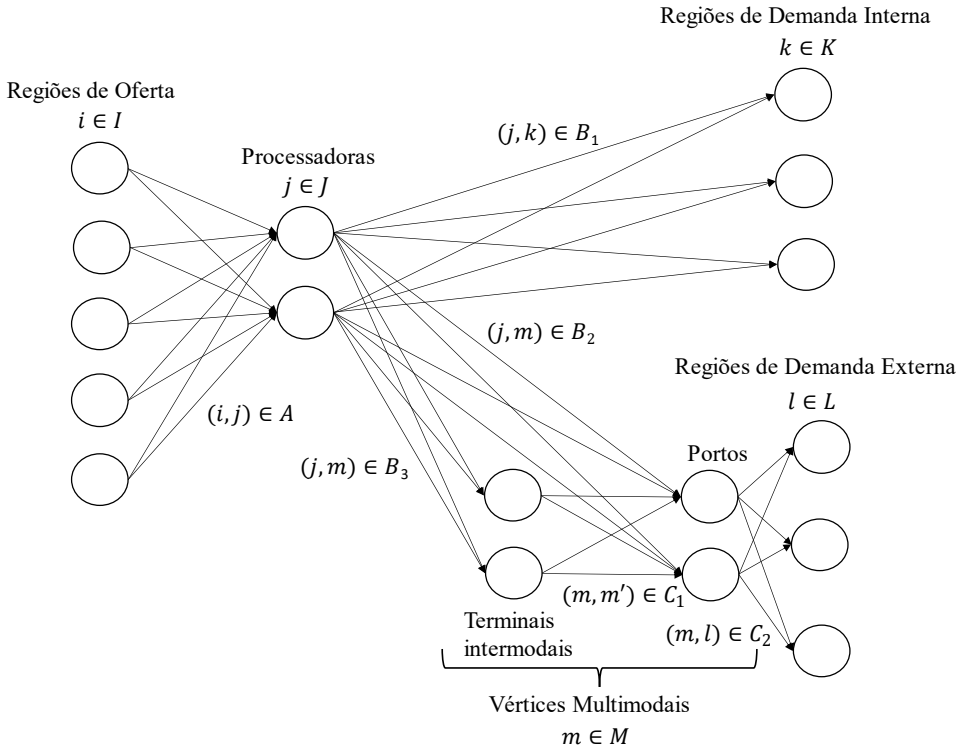


Figura 2: Infraestrutura do complexo da soja

Os custos incorridos no complexo da soja podem ser cobrados tantos nos vértices da rede quanto nos arcos. Em se tratando dos vértices, os custos cobrados nas unidades industriais incluem β_{sj}, que é o custo de produção do subproduto s na fábrica j (R$/tonelada); γ_j, que é o custo de armazenagem de soja em grão na fábrica j (R$/tonelada) e $\theta_{s\prime j}$, que representa do custo de armazenagem de subprodutos industrializados s na fábrica j (R$/tonelada). Nos vértices de transbordo, os custos considerados são b_k, que é o custo de transbordo para embarque na ferrovia ou hidrovia k (R$/tonelada) e o_m, que representa o custo de embarque no porto m (R$/tonelada). Para os vértices de demanda, são ainda considerados os custos φ_{sk}^t, de entrega em atraso do subproduto s na região de demanda interna k no período t (R$/tonelada) e ϕ_{sl}, para a entrega em atraso do subproduto s na região de demanda externa l (R$/tonelada).

Nos arcos da rede, são considerados os seguintes custos lineares de transporte: c'_{ij}, que é o custo de transporte rodoviário da soja em grão entre a região de oferta i e a unidade produtiva j, $(i,j) \in A$ (R$/tonelada); c''_{ij}, o custo de transporte rodoviário dos subprodutos industriais entre as fábricas i e as regiões de demanda do mercado interno, os terminais intermodais e os portos, $(i,j) \in B$ (R$/tonelada); c'''_{km}, o custo de transporte ferroviário ou hidroviário entre os terminais intermodais k e as regiões de demanda externa m, $(k,m) \in C$ (R$/tonelada).

As variáveis de decisão estão divididas entre quatro categorias. As variáveis de transporte, que compreendem: x_{ij}^t, que é a quantidade de soja em grão transportada da região de oferta i para a fábrica j no período t, $(i,j) \in A$ (toneladas); y_{sjk}^t, que é a quantidade do subproduto s transportada por rodovia da fábrica j para o mercado interno k ou para um ponto de transbordo m

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

no período t, (j, k) $\in B$ (toneladas); e z_{skm}^t, que é a quantidade do subproduto s transportada por via marítima dos portos k até os pontos de demanda externa l no período t, $(k, m) \in C$ (toneladas).

As variáveis de fabricação, dadas por w_{pj}^t, representam a quantidade de matéria prima do tipo p processada na fábrica j no período t (toneladas), enquanto q_{gj}^t é a quantidade do produto g produzido a partir do óleo bruto. As variáveis de estoque, que são e_j^t, que é a quantidade de soja em grão armazenada na fábrica j ao final do período t (toneladas) e E_{sj}^t, que é a quantidade do subproduto s armazenado na fábrica j ao final do período t (toneladas). Têm-se ainda as variáveis de entrega em atraso, representadas por f_{sk}^t, que é a quantidade do subproduto s não entregue no ponto de demanda interna k no período t (toneladas) e F_{sl}^t, que é a quantidade do subproduto s não entregue no ponto de demanda externa l no período t (toneladas).

O modelo de planejamento tático para o complexo da soja pode ser formulado pelas equações (1.a) a (24), a seguir:

$$Min \sum_{(i,j)\in A}\sum_{t\in T} c'_{ij}x_{ij}^t + \sum_{s\in S}\sum_{(i,j)\in B}\sum_{t\in T} c''_{ij}y_{sij}^t + \sum_{s\in S}\sum_{(m,l)\in C}\sum_{t\in T} c'''_{ml}z_{sml}^t \quad (1.a)$$

$$+\sum_{s\in S}\sum_{(m,l)\in C}\sum_{t\in T} b_{ml}z_{sml}^t \quad (1.b)$$

$$+\sum_{p\in P}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} \delta_{pj}w_{pj}^t + \sum_{g\in G}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} \beta_{gj}q_{gi}^t \quad (1.c)$$

$$+\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} \gamma_j e_j^t + \sum_{s\in S}\sum_{j\in J}\sum_{t\in T} \theta_{sj}E_{sj}^t \quad (1.d)$$

$$+\sum_{s\in S}\sum_{k\in K}\sum_{t\in T} \varphi_{sk}^t f_{sk}^t + \sum_{s\in S}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T} \phi_{sl}^t F_{sl}^t \quad (1.e)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j\in J:(i,j)\in A} x_{ij}^t \le a_i^t \qquad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i\in I:(i,j)\in A} x_{ij}^t + e_j^{t-1} = w_{1j}^t + e_j^t \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, e_j^0 \ge 0 \quad (3)$$

$$\alpha_{2j}w_{2j}^t + E_{2j}^{t-1} = \sum_{(j,k)\in B} y_{2j}^t + E_{2j}^t + q_{4j}^t + \psi_j q_{5j}^t \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, E_{2j}^t \ge 0 \quad (4)$$

$$\alpha_{3j}w_{1j}^t + E_{3j}^{t-1} = \sum_{(j,k)\in B} y_{3jk}^t + E_{3j}^t + \mu_j w_{3j}^t \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, E_{3j}^t \ge 0 \quad (5)$$

$$\alpha_{4j}w_{2j}^t + E_{4j}^{t-1} = \sum_{(j,k)\in B} y_{4j}^t + E_{4j}^t \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, E_{4j}^t \ge 0 \quad (6)$$

$$\alpha_{5j}\psi_j q_{5j}^t + E_{5j}^{t-1} = \sum_{(j,k)\in B} y_{5j}^t + E_{5j}^t \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, E_{5j}^t \ge 0 \quad (7)$$

$$\alpha_{6j}\mu_j w_{3j}^t + E_{6j}^{t-1} = \sum_{(j,k)\in B} y_{6j}^t + E_{6j}^t \qquad \forall j \in J, \forall t \in T, E_{5j}^t \ge 0 \quad (8)$$

$$\sum_{j\in J:(m,j)\in B_3} y_{sjm}^t = \sum_{l\in l:(m,l)\in C} z_{sml}^t \qquad \forall s \in S, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j\in J:(j,k)\in B_2} y_{sjk}^t = d_{sk}^t - f_{sk}^t + f_{sk}^{t-1} \qquad \forall s \in S, \forall k \in K, \forall t \in T, f_{sk}^{|T|} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{m\in M:(m,l)\in C} z_{sml}^t = D_{sl}^t - F_{sl}^t + F_{sl}^{t-1} \qquad \forall s \in S, \forall k \in K, \forall t \in T, F_{sk}^{|T|} = 0 \quad (11)$$

$$w_{pj}^t \le v_{pj} \qquad \forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (12)$$

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

$$q_{gj}^t \leq \lambda_{gj} \qquad \forall g \in G, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (13)$$
$$e_j^t \leq r_j \qquad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (14)$$
$$E_{sj}^t \leq h_{sj} \qquad \forall s \in S, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (15)$$
$$\sum_{s \in S} \sum_{j \in J:(j,m) \in C} y_{jm}^t \leq u_m \qquad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (16)$$
$$x_{ij}^t \geq 0 \qquad \forall (i,j) \in A, \forall t \in T \quad (17)$$
$$y_{sjk}^t \geq 0 \qquad \forall s \in S, \forall (j,k) \in B, \forall t \in T \quad (18)$$
$$z_{smk}^t \geq 0 \qquad \forall s \in S, \forall (m,k) \in C, \forall t \in T \quad (19)$$
$$w_{pj}^t \geq 0 \qquad \forall p \in P, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (20)$$
$$e_j^t \geq 0 \qquad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (21)$$
$$E_{sj}^t \geq 0 \qquad \forall s \in S, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (22)$$
$$f_{sl}^t \geq 0 \qquad \forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (23)$$
$$F_{sk}^t \geq 0 \qquad \forall s \in S, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (24)$$

A função objetivo está dividida em cinco componentes de custos. A equação (1.a) define os custos de transporte na rede, sendo a primeira parcela referente aos custos de transporte de matéria prima, isto é, o transporte da soja em grão das regiões de oferta até as unidades industriais. A segunda parcela trata dos custos rodoviários de transporte entre as fábricas e as regiões de demanda do mercado interno, os terminais intermodais e os portos. A terceira parcela diz respeito aos custos de transporte ferroviário, hidroviário e marítimo para o atendimento das regiões de demanda externa. A equação (1.b) se refere aos custos de transbordo e embarque nos portos. A equação (1.c) se relaciona aos custos de processamento nas unidades industriais, sendo a primeira parcela referente à produção de óleo bruto, farelo e proteína concentrada de soja, enquanto a segunda parcela computa dos custos de produção de óleo refinado e biodiesel. A equação (1.d) se refere aos custos de estocagem, sendo a primeira parcela referente à soja em grão e a segunda aos demais produtos considerados no complexo. A equação (1.e) trata dos custos de entrega em atraso, que podem ocorrer tanto nas regiões de demanda interna quanto nas regiões de demanda externa.

As restrições (2) representam o balanço da oferta da soja em grão transportada de cada região de oferta para as fábricas em cada período de planejamento. As restrições (3) a (8) representam os balanços de estoques dos produtos e estão ilustrados na Figura 3. Em (3), têm-se o balanço de estoque da soja em grão em cada fábrica para todos os períodos, considerando-se as chegadas de material que ocorrem nas fábricas e os envios para o processo de esmagamento. As restrições (4) representam o balanço de estoque de óleo bruto em cada fábrica e em cada período. Nesse caso, o óleo bruto proveniente do esmagamento pode ser enviado para o estoque, para os processos de refino ou de transesterificação ou ser transportado para atendimento das demandas. No caso da transesterificação, ela só pode ser realizada nas fábricas que possuem esse tipo de licença. Em (5), ocorre o balanço de estoques de farelo, que é o outro produto do esmagamento. O farelo pode ser estocado, enviado para atendimento das demandas ou ser beneficiado, em fábricas que possuem esse processo industrial, em cada fábrica e para todos os períodos de planejamento. Em (6), ocorre o balanço de estoque do óleo refinado em cada fábrica em cada período. Em (7), o balanço de estoque de biodiesel em cada fábrica em cada período só ocorre em fábricas que possuem o processo de transesterificação. As restrições descritas em (8) mostram o balanço de estoque da proteína concentrada de soja, obtida em fábricas realizam de beneficiamento. Os estoques iniciais de todos os produtos podem ou não ser nulos em todas as fábricas.

As restrições descritas em (9) representam a conservação de massa durante o transbordo nos terminais intermodais e portos, para cada produto e período de planejamento. Nas equações (10) e (11) são descritas as restrições de atendimentos das demandas internas e externas, respectivamente, para todos os produtos, sendo possível a entrega em atraso, com exceção do último período, que deve ter todas as demandas atendidas, mesmo as atrasadas. As restrições (12) a (16) dizem respeito às capacidades na rede para todos os períodos de planejamento, sendo que (12) se refere às capacidades de processamento de matérias primas em cada fábrica e (13) se refere

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

às capacidades de produção de óleo refinado e biodiesel, (14) diz respeito às capacidades de estocagem de soja em grão em cada fábrica, enquanto (15) tratam das capacidades de estocagem dos subprodutos em cada fábrica. Em (16) são representados os limitantes de capacidade de transbordo em cada terminal intermodal e em cada porto em todos os períodos. As restrições representadas em (17) a (24) se referem à não negatividade de todas as variáveis do modelo.

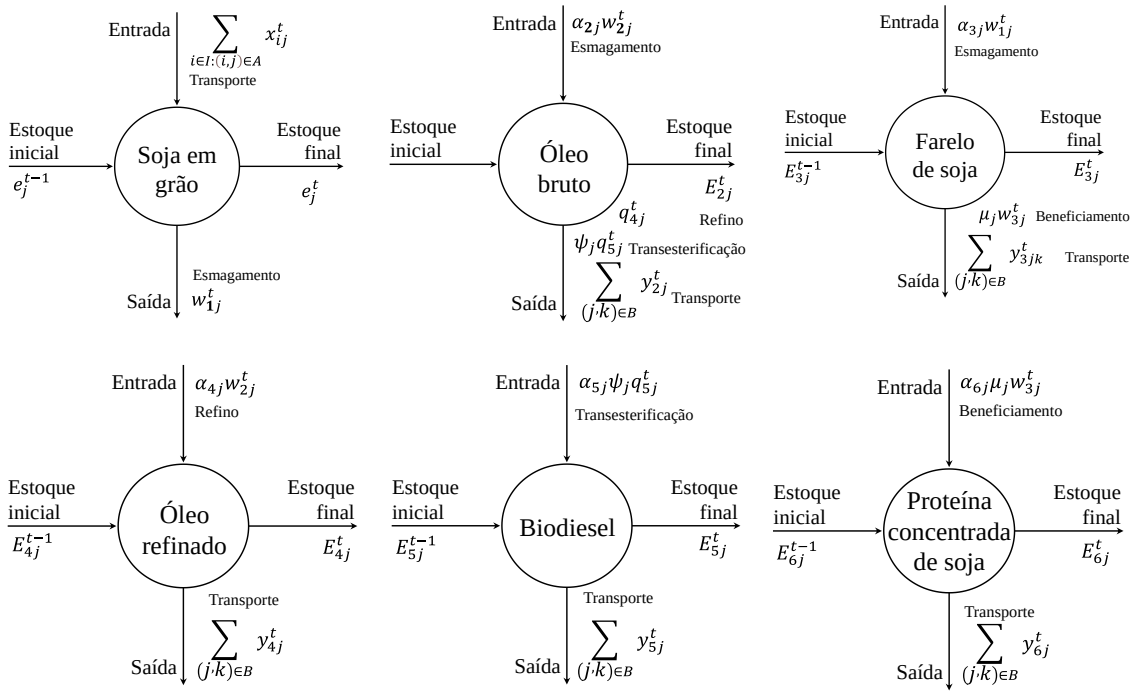


Figura 3: Balanço de massa dos produtos do complexo da soja

4. Resultados Computacionais Preliminares

Os experimentos computacionais com o modelo apresentado nas equações (1) – (24) foram realizados em um computador Intel Core i3-1005G1, 1.200 GHz, 8 GB de memória RAM, sistema operacional Windows 11 64 bits, utilizando-se o *software* AMPL/CLPEX versão 11.1. Os cenários utilizados para a realização dos testes preliminares foram construídos com base em dados secundários, obtidos em agências reconhecidas como fontes de confiáveis, tais como ABIOVE [2023], APROSOJA [2023], CONAB [2023], Embrapa [2023], IBGE [2023] e Sifreca [2023].

Foram consideradas duas unidades processadoras de soja, localizadas em Itumbiara – GO e Maringá - PR. As quatro regiões de oferta de soja em grão representam centroides que concentram as produções de soja dos estados de Mato Grosso, Bahia, São Paulo e Paraná, como mostrado na Figura 4. Foram considerados quatro pontos de demanda interna, localizados nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná. As demandas de exportação foram representadas nos portos de Paranaguá - PR, Salvador - BA, Santarém – PA, Santos – SP, São Luís - MA e Vitória - ES. Foram considerados os terminais ferroviários estão localizados em Maringá - PR, Porto Franco - MA e Uberaba – MG e o terminal hidroviário está em São Simão - GO.

Os fluxos de matéria prima, isto é, da soja em grão são mostrados na Figura 4. Para o cenário inicial, as produções de soja dos estados de São Paulo e Paraná são suficientes para o atendimento das duas fábricas consideradas. 30% da soja produzida no Paraná foi enviada para a fábrica de Maringá, enquanto 7% da soja produzida no estado de São Paulo foi enviada para a mesma fábrica. A fábrica de Itumbiara recebeu 65% da produção de São Paulo. Apenas dois dos estados considerados como fontes de matéria prima foram efetivamente usados no cenário base. Esse resultado é condizente com a realidade do sistema, embora a maioria das fábricas tenha que recorrer à produção de soja de outros estados, especialmente do Mato Grosso, para garantir o seu funcionamento ao longo do ano. Isso se deve ao fato da grande maioria da soja colhida nos estados

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

de São Paulo e Paraná ser exportada *in natura*, próximo dos períodos de colheita, não gerando estoque excedente para aproveitamento pelas indústrias esmagadoras.



Figura 4: Vértices considerados na rede



Figura 5: Rotas de entrega da soja em grão

A Figura 6 mostra as rotas de atendimento da demanda interna. As duas fábricas, de Itumbiara e Maringá, enviam produtos para todas as regiões de demanda interna. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fluxo de dois dos produtos considerados no complexo, o biodiesel e a proteína concentrada de soja. Como cada um desses produtos é produzido em apenas uma das fábricas disponíveis, é preciso que cada uma delas atenda a todos os clientes da demanda interna.

A Figura 7 mostra os fluxos de atendimento das demandas de exportação. É possível perceber que a fábrica de Maringá utilizou apenas rotas rodoviárias para o atendimento das demandas externas, devido à sua proximidade com os portos de Santos e Paranaguá. A fábrica de Itumbiara, por estar em uma localização bastante centralizada, fez uso de duas rotas multimodais, ambas com composição rodo-ferroviária, no atendimento das demandas externas, pelos portos de Vitória e São Luís. No entanto, rotas rodoviárias foram utilizadas para realizar as entregas nos portos de Santos e Salvador.



Figura 6: Atendimento das demandas internas



Figura 7: Atendimento das demandas externas

As unidades industriais possuem diferenciação quanto aos processos disponíveis e quanto às capacidades de produção. A Tabela 1 mostra as porcentagens de utilização de cada um dos

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

processos industriais disponíveis em cada fábrica. É possível observar que o processo de esmagamento, que produz óleo bruto e farelo de soja, possui capacidade mais folgada que os demais processos em ambas as fábricas. O processo de refino, nas duas fábricas, alcançou altas taxas de utilização nas duas fábricas, sendo que Maringá chegou a quase 92% de utilização, enquanto Itumbiara ficou em torno de 83%, ambas no mês de Junho. A biorrefinaria de Maringá, representada pelo processo de transesterificação, apresentou as maiores taxas de utilização médias, considerando-se todos os processos produtivos, com média de 85,61% no ano, o que mostra que o sistema é bastante representativo do sistema real, pois o mercado de biodiesel tem sido considerado rentável e apresenta demanda crescente ao longo da última década. A produção de proteína concentrada de soja, representada pelo processo de enriquecimento, também na fábrica de Maringá, apresentou pico de produção em Fevereiro e não apresentou produção nos últimos quatro meses.

Tabela 1: Porcentagens de utilização nas unidades industriais

Mês	Maringá				Itumbiara	
	Esmagamento	Refino	Transesterificação	Enriquecimento	Esmagamento	Refino
Janeiro	21,19%	42,38%	76,79%	18,72%	21,74%	49,18%
Fevereiro	26,75%	53,51%	76,94%	100,00%	21,50%	48,63%
Março	33,32%	66,65%	83,32%	23,70%	33,80%	76,45%
Abril	33,86%	67,72%	74,34%	18,74%	27,98%	63,29%
Maio	34,05%	68,10%	79,41%	18,05%	33,58%	75,96%
Junho	45,80%	91,61%	93,69%	19,09%	36,63%	82,85%
Julho	35,14%	70,29%	99,33%	21,08%	34,35%	77,70%
Agosto	31,69%	63,39%	97,83%	20,62%	33,45%	75,65%
Setembro	27,62%	55,25%	92,38%	0,00%	31,88%	72,10%
Outubro	28,27%	56,54%	92,77%	0,00%	32,85%	74,31%
Novembro	30,01%	60,03%	82,82%	0,00%	29,58%	66,91%
Dezembro	23,54%	47,08%	77,76%	0,00%	22,77%	51,50%

Também se faz necessário avaliar os estoques gerados durante os períodos de planejamento, como mostrado na Tabela 2. Em relação à soja em grão, existe a necessidade de se manter altos níveis de estoque durante a maior parte dos períodos de planejamento, uma vez que a mesma só é colhida no início de cada ano, tornando o planejamento mais complexo. Em alguns casos, pode ser necessário o estabelecimento de estoques de passagem de um ano para o outro, a fim de evitar entregas em atraso provocadas pela falta de matéria prima para o processo de esmagamento, que é o primeiro do complexo. No cenário base, esse estoque de passagem não foi necessário, devido à alta disponibilidade de matéria prima nos centroides de oferta de soja em grão.

Tabela 2: Porcentagens de utilização dos estoques por produtos ao longo do ano

Mês	Maringá				Itumbiara		
	Soja em Grão	Óleo Refinado	Farelo	Proteína Concentrada	Soja em Grão	Óleo Refinado	Farelo
Janeiro	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	61,33%	0,00%
Fevereiro	0,00%	12,64%	9,45%	94,10%	0,00%	0,00%	0,00%
Março	0,00%	0,00%	30,50%	100,00%	61,00%	0,00%	0,00%
Abril	97,48%	20,92%	33,24%	100,00%	80,78%	0,00%	0,00%
Maio	88,83%	100,00%	33,51%	100,00%	70,14%	72,00%	0,00%
Junho	70,51%	20,69%	90,13%	100,00%	58,54%	100,00%	0,00%
Julho	56,46%	0,00%	92,47%	100,00%	47,67%	15,80%	4,18%
Agosto	43,78%	0,00%	71,01%	100,00%	37,08%	0,00%	22,64%
Setembro	32,73%	21,84%	37,40%	75,55%	26,98%	71,00%	39,15%
Outubro	21,42%	0,00%	18,83%	48,50%	16,58%	0,00%	57,32%
Novembro	9,42%	0,00%	5,79%	28,48%	7,21%	0,00%	73,32%
Dezembro	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	84,64%

Em relação aos estoques de farelo de soja, foram observados altos níveis de estoque ao longo do ano para as duas fábricas, uma vez que no processo de esmagamento da soja, este

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

subproduto apresenta a maior parte do rendimento em relação ao óleo bruto. Muito embora o consumo de farelo só tenha aumentado nos últimos anos e a proteína concentrada de soja tenha entrado com sucesso no mercado internacional, exportada principalmente para a União Europeia, ainda é comum nas empresas esmagadoras o acúmulo desse produto em alguns meses do ano. Não houve estoque de óleo bruto e nem de biodiesel. Sendo assim, todas as quantidades produzidas nas fábricas ao longo do ano foram imediatamente direcionadas para o atendimento das demandas.

Os custos para o cenário base foi de R$ 907.336.757,10. Desse total, 27,98% representam os custos de transporte e transbordo na rede. Os custos com os processos industriais representaram 65,89% e os custos com estocagem representaram apenas 6,13%. O cenário base não apresentou custos de entrega em atraso, tendo atendido todas as demandas no prazo. Para cenários alternativos testados, e no sistema real, se observa a compra de soja em regiões de oferta mais distantes e essa decisão se justifica pelo fato da maior parcela de custos estar concentrada nas unidades industriais, sendo que os custos de industrialização e de estocagem, representam mais de 70% dos custos totais.

De modo geral, a rede desenvolvida apresenta resultados importantes e compatíveis com o sistema real, como, por exemplo, os fluxos concentrados para atendimento das demandas, tendendo à clusterização de algumas rotas, a necessidade de uma melhor gestão da demanda e da distribuição do farelo de soja gerado no processo de esmagamento da soja e, principalmente, a importância da manutenção de estoques da soja em grão durante os períodos de colheita e nos meses subsequentes, de forma a garantir a produção dos subprodutos ao longo do ano, sem grandes variações nos custos e na qualidade da matéria prima.

5. Considerações Finais

A cadeia agroindustrial da soja no Brasil apresenta grande importância econômica e tem despertado o interesse de pesquisadores nos últimos anos, devido principalmente ao crescimento dos mercados de biocombustíveis, em especial o biodiesel e de insumos para a alimentação animal, como é o caso do farelo de soja e da proteína concentrada de soja. A sazonalidade da oferta da soja em grão, as longas distâncias a serem cobertas em rotas de entrega dos diversos produtos da cadeia e a determinação do *mix* de produção e as quantidades de matéria prima e subprodutos que devem ser estocados ao longo do ano são algumas das dificuldades de gestão encontrada pelos tomadores de decisão. Nesse contexto, apresentou-se um modelo de planejamento operacional, considerando a coordenação das atividades de industrialização, transporte e armazenagem dos quatro principais produtos do complexo da soja: o grão, o farelo e os óleos bruto e refinado.

Muito embora o modelo apresentado esteja em fase preliminar de testes, várias particularidades do sistema real estão representadas, permitindo o auxílio ao processo de tomada de decisões em um horizonte de planejamento tático. Pode-se citar, por exemplo, situações em que se tem que adquirir matéria prima em estados mais distantes, devido à escassez de ofertas de soja em grão próximas às fábricas. As capacidades de processamento e armazenagem nas fábricas podem se tornar gargalos, criando dificuldades de abastecimento tanto nos mercados internos quanto de exportação, obrigando as empresas a realizarem entregas em atraso. Como pesquisas em andamento e perspectivas futuras para o trabalho, têm-se a construção de cenários alternativos para diferentes configurações e escalas de empresas, e a análise de sensibilidade considerando as variáveis duais. Além disso, cita-se a avaliação de cenários de incertezas no sistema, podendo-se utilizar, por exemplo, técnicas de otimização robusta para realizar essas análises.

Referências

ABIOVE (2023). Web page: `https://abiove.org.br/`. Acessado: 2023-02-20.

Ahumada, O. e Villalobos, R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: a review. *European Journal of Operational Research*. 195:1-20.

Almeida, M. S., Amaral, M. e Morabito, R. (2016). Um estudo sobre localização de terminais intermodais na rede de escoamento da soja brasileira. *Production*, 26:562–580.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205

Amaral, M., Almeida, M. S. e Morabito, R. (2012). Um modelo de fluxos e localização de terminais intermodais para escoamento da soja brasileira destinada à exportação. *Gestão & Produção*, 19:717–732.

APROSOJA BRASIL (2023). Web page: https://aprosojabrasil.com.br/. Acessado: 2023-02-20.

Carrão-Panizzi, M. C. (2013). Melhoramento de cultivares de soja especiais para processamento e utilização. In: *Americas: International Conference on Soybean Utilization*, Bento Gonçalves.

Clott, C., Hartman, B. C., Ogard, E. e Gatto, A. (2015). Container repositioning and agricultural commodities: shipping soybeans by container from US hinterland to overseas markets. *Research in Transportation Business & Management*, 14:56-65.

CONAB (2022). Acompanhamento da safra brasileira - safra 2021/2022 10º levantamento. *Compêndio de estudos CONAB*, 9(10):11-88.

CONAB (2023). Web page: https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/791-arroz. Acessado: 2023-02-20.

Dubke, A. F. e Pizzolato, N. D. (2011). Location model of specialized terminals for soybean exports in Brazil. *Pesquisa Operacional*, 31:21–40.

EMBRAPA (2023). Web page: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz.Acessado: 2023-20-20.

IBGE (2023). Web page: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/. Acessado: 2023-02-20.

García-Flores, R., Souza Filho, O. V., Martins, R. S., Martins, C. V. B. e Juliano, P. (2015). Using logistic models to optimize the food supply chain. *Modelling Food Processing Operations*, 11:307-330.

Guimarães, V. A, Skroder, G. C., Ribeiro, G. M. e González, P. H. (2021). Strategic planning of freight Transportation to support smart cities design: the Brazilian soybean case. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 98:104-116.

Jedermann R., Nicometo, M., Uysal, I., Lang, W. (2014). Reducing food losses by intelligent food logistics. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 5:372. doi: 10.1098/rsta.2013.0302.

Liu, X., Bai, Y. e Chen, J. (2017). An intermodal transportation geospatial network modeling for containerized soybean shipping. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2:143-153.

Lopes, H. S., Lima, R, S. e Ferreira, R. C. (2016). A cost optimization model of Transportation routes to export the Brazilian soybean. *Custos e @gronegócio on line*, 12(4):90-109.

Lopéz, J. J. U. e Qassim, R. Y. (2017). An optimal redesign approach of optimal global supply chain redesign: Brazilian soybean grain study. *Business and Management Horizons*, 5(2):84-111.

Merener, N., Moyano, R., Stier-Moses, N. E. e Watfi, P. (2015). Optimal trade and shipping of agricultural commodities. *Journal of Operational Research Society*, 0:1-13.

Oliveira, A. L. R., Filasse, M., Lopes, B. F. R. e Marsola, K. B. (2021). Logistical Transportation routes optimization for Brazilian soybean: an application of origin-destination matrix. *Ciência Rural, Santa Maria*, 51(2):1-13.

Paksoy, T., Pehlivan, N. Y. e Özceylan, E. (2012). Application of fuzzy optimization to a supply chain network design: a case study of an edible vegetable oils manufacturer. *Applied Mathematical Modelling*, 36:2762-2776.

SIFRECA (2023). Web page: https://sifreca.esalq.usp.br/. Acessado: 2023-02-20.

Taşkiner. T. e Bilgen, B. (2021). Optimization models for harvest and production planning in agri-food supply chain: a systematic review. *Logistics*. 5(3):52-79.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-175205
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/175205