

LOCALIZAÇÃO DE CENTROS DE INTEGRAÇÃO LOGÍSTICA CONSIDERANDO CRITÉRIOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS: APLICAÇÃO AO TRANSPORTE DE SOJA NO BRASIL

Conrado Vidotte Plaza^{[1][3]}
Vanessa de Almeida Guimarães^{[2][3]}
Gustav Carl Skroder^[3]
Glaydston Mattos Ribeiro^[3]
Laura Silvia Bahiense da Silva Leite^[3]

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/Macaé

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ

³Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE

RESUMO

Esse trabalho propõe a aplicação do modelo matemático multiobjetivo de localização de Centros de Integração Logística (CILs) apresentado por Guimarães (2018) ao contexto do transporte da soja, considerando critérios econômicos (custos de transporte e movimentação) e ambientais (emissão de CO₂). Para isso, elaboraram-se cenários voltados à realidade brasileira, a partir de informações disponíveis no Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), e avaliaram-se os ganhos financeiros e ambientais obtidos com a localização otimizada dos CILs. Os resultados obtidos para os cenários avaliados indicaram ganhos de eficiência no sistema, a partir de economias tanto dos custos logísticos (de 22% a 40%) quanto das emissões de carbono (de 24% a 38%). Por fim, verificou-se que o estudo de localização de CILs poderia proporcionar intermodalidade na rede, capaz de aumentar a eficiência da operação dos sistemas de transportes e logísticos, estendendo os ganhos para o âmbito ambiental, subsidiando a tomada de decisões e elaboração de planos estratégicos.

ABSTRACT

This work proposes the application of the multi-objective mathematical model for the localization of Logistic Integration Centers (CILs) presented by Guimarães (2018) to the transportation of soybean, considering economic criteria (transport and mobilization costs) and environmental criteria (CO₂ emission). In order to do this, scenarios focused on the Brazilian reality were prepared based on information available in the National Logistics and Transport Plan (PNLT) regarding soybean transport, and the financial and environmental gains obtained with the optimized location of CILs were evaluated. The results obtained for the scenarios evaluated indicated efficiency gains in the system, with savings in both logistics costs (from 22% to 40%) and carbon emissions (from 24% to 38%). Finally, it was verified that the CIL location study could provide intermodality in the network, capable of increasing the efficiency of transport and logistics systems operation, extending the gains to the environment, supporting decision-making and the elaboration of strategic plans.

1. INTRODUÇÃO

O setor de transportes possui problemas estruturais relevantes que comprometem a qualidade dos serviços prestados e o desenvolvimento econômico e social do país (Fleury e Wanke, 2006). O relatório da CNT (2018) destaca que as lacunas no planejamento e no desenvolvimento de um sistema de transporte integrado têm conduzido a desequilíbrios na matriz de transporte (com diferentes níveis de eficiência na operação dos modos de transporte), a desigualdades entre regiões e a entaves à circulação de bens e pessoas. Devido à pouca integração do sistema de transportes e ao desequilíbrio da matriz de transportes, o uso do modo rodoviário sobrepõe-se aos outros, ocasionando, dentre outros problemas, impactos econômicos e ambientais negativos.

Visando melhorias aos sistemas de transportes, diferentes planos e programas estaduais e federais foram lançados ao longo das duas últimas décadas. Dentre esses, em escala nacional, destaca-se o Plano Nacional de Logística e Transportes – PNL – um plano plurianual, composto por estimativas de produção e de consumo para um grupo de produtos, com

indicações sobre a atual infraestrutura, bem como os investimentos planejados para sua melhoria até 2031 (Ministério dos Transportes – MT, 2007, 2009, 2012).

O PNLТ sinaliza a necessidade de investimentos específicos na infraestrutura de transporte (ampliação ou implantação), além de necessidade de otimização das operações visando a multimodalidade e a intermodalidade em prol da eficiência econômica e operacional. Nesse contexto, faz-se necessária a implantação de Centros de Integração Logística (CILs), tanto para equilibrar a matriz de transportes e reduzir os custos logísticos envolvidos quanto aumentar sua eficiência energética a longo prazo.

No entanto, para que tais estruturas de integração possibilitem a otimização dos custos logísticos totais, torna-se necessário que elas estejam localizadas em pontos estratégicos do território nacional, considerando os fluxos de carga entre pontos de produção e consumo nacionais e internacionais (Guimarães, 2015). Neste sentido, um importante projeto foi desenvolvido pelo Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, visando propor uma metodologia para a localização dos CILs de maneira a apoiar o desenvolvimento das políticas públicas voltadas para este setor (SPNT, 2015).

Ante o exposto, o objetivo desse estudo consiste em determinar a localização ótima de CILs voltados exclusivamente para o transporte da soja brasileira, considerando critérios econômicos e ambientais. Para tanto, com as matrizes do PNLТ, aplicou-se o modelo matemático multiobjetivo de localização proposto por Guimarães (2018). A escolha desse modelo se deu por conta da sua orientação ao planejamento estratégico governamental, a partir de premissas econômicas e ambientais. Já a escolha da soja é justificada pela sua relevância na matriz nacional - representou 52% da produção total de grãos no Brasil na safra de 2017/18 e já representa 48% da safra 2018/19 (CONAB, 2019).

A partir desta introdução, o artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta uma breve discussão teórica sobre a importância da soja e dos sistemas logísticos, além de sintetizar as abordagens de localização de estruturas logísticas e avaliação de emissões ambientais em sistemas logísticos. A Seção 3 detalha o modelo matemático que foi aplicado nesse trabalho. A Seção 4 descreve a aplicação do modelo multiobjetivo aos cenários elaborados. Por fim, na Seção 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A economia brasileira está diretamente relacionada ao agronegócio, desde da colonização até o processo de industrialização, no qual a soja tornou-se destaque, devido ao elevado ritmo de crescimento da população e pelo aumento da renda per capita, que refletiu em maior consumo de proteína animal (RENAI, 2018). Além de ser a principal matéria-prima utilizada na formulação das rações, ela também é usada na produção de óleo vegetal e biodiesel. Estima-se, ainda, que a safra 2018/19 alcance 114,8 milhões de toneladas. Diante da importância econômica desta *commodity*, torna-se muito importante o seu escoamento de forma eficiente, com o objetivo de agregar valor ao produto e seu comércio.

No entanto, a eficiência brasileira no setor de transportes é considerada baixa, implicando diretamente nas relações comerciais nacionais e internacionais. Como exemplo, o custo logístico representa de 10,6% a 15,4% do valor do Produto Interno Bruto (PIB) nacional,

comparado aos 8,5% relativos aos Estados Unidos (Rebelo 2011; CNT, 2014; Guimarães *et al.*, 2018). Um estudo da CNT e da COPPEAD desenvolvido em 2002 já indicava, à época, que a melhora na eficiência do setor de transportes permitiria um desenvolvimento regional que agregaria valor, em âmbito internacional, aos produtos brasileiros (CNT e COPPEAD, 2002).

De acordo com o Boletim Estatístico – CNT (2018), a matriz de transporte de cargas é realizada majoritariamente pelo modo rodoviário (61,1%), seguido pelo ferroviário (20,7%), aquaviário (13,6%), dutoviário (4,2%) e aéreo (0,4%). Essa distribuição modal transparece a dependência do sistema logístico de cargas com o modo rodoviário, que pode ser prejudicial para o desenvolvimento econômico regional diante de falhas na operação. Há de se considerar, ainda, que, em determinadas regiões, não há estruturas que permitam a integração e transferência modal e/ou estas são ineficientes (Guimarães, 2015).

Esta falta de integração não é exclusividade brasileira. Bhattacharya *et al.* (2014) destacam que a opção recorrente pela unimodalidade (mesmo quando mais de um modo está disponível) é resultante do fato dos agentes de transporte (transportadores, demandadores e empresas) buscarem minimizar seus custos em vez de ter como objetivo aumentar os lucros da cadeia de suprimentos como um todo. Além disso, Meisel *et al.* (2013) indicam que o transporte intermodal enfrenta desafios operacionais, tais como: (i) requer esforço para coordenar as atividades que envolvem diferentes agentes; (ii) corre-se o risco de ter longos tempos de entrega, especialmente no transporte porta-a-porta; e (iii) pode ter custos adicionais ligados ao frete ou à operação de transbordo, que podem, em determinadas situações, superar os ganhos de escala associados à intermodalidade.

Nesse contexto, é evidente que a eficiência da integração modal, ou seja, de um transporte intermodal para distribuição de cargas, não depende apenas da existência da tecnologia veicular, mas também da presença de estruturas de apoio, como os CILs. Para que isso aconteça de maneira efetiva, é necessário um planejamento no setor de transportes, levando-se em consideração metodologias que possibilitem avaliar como, onde e de que forma as estruturas de integração modal devem ser consideradas no planejamento de transportes.

Com o intuito de estabelecer essa integração modal, em 2007, projetos indicados pelo PNLT foram propostos, enfatizando investimentos em infraestrutura de transportes, equilíbrio da matriz modal de carga e ampliação da intermodalidade do Sistema Nacional de Viação (SNV). Ao longo dos anos, as proposições do PNLT sofreram modificações técnicas, incluindo pontos antes não abordados, como levar em consideração menores índices de poluição atmosféricas, na versão atualizada do PNLT em 2012 (Carneiro, 2016; Costa, 2014; Guimarães, 2015; Guimarães, 2018).

Os CILs facilitam a intermodalidade, reduzindo os custos envolvidos. Contudo, para a otimização dos custos logísticos totais, é importante que estes sejam localizados em pontos estratégicos do território nacional, de acordo com os fluxos de carga entre pontos de produção e consumo. Guimarães (2015) apresenta diferentes tipos de modelos de localização que podem ser aplicados para determinar a região ótima de instalação de um CIL, dentre eles: Problema de Cobertura, Problema de p-Centros, Problema de p-Medianas e Problema de Localização.

Visando aprofundar o conhecimento quanto ao tipo localização, Guimarães (2015) compara alguns trabalhos situados na esfera do planejamento estratégico e envolvendo o transporte multimodal/intermodal. Dentre eles, destaca-se o de Costa (2014), que utilizou os dados do PNLT em um modelo matemático baseado no conceito das economias de escala para a minimização dos custos totais de transporte por meio do uso de CILs. No entanto, esse modelo permitia que demandas distintas de um mesmo produto fossem combinadas dentro de um CIL, não respeitando o atendimento explícito das demandas par-a-par (demandas entre zonas de produção e de consumo). Os trabalhos de Guimarães (2015) e Guimarães *et al.* (2018) refinaram o trabalho de Costa (2014) ao impor o atendimento explícito das demandas par-a-par, tornando-o aderente a uma realidade econômica em que fornecedores de bens e serviços preocupam-se em atender clientes específicos e/ou respeitar contratos já estabelecidos, podendo haver relações de confiança entre produtores e consumidores, não estando os clientes dispostos a ter sua demanda satisfeita por outros fornecedores.

Na literatura, a maioria dos trabalhos de localização de facilidades consideram apenas critérios econômicos. Ghaddar e Naoum-Sawaya (2012) quebraram esse paradigma ao propor um modelo de programação matemática inteira mista não-linear para lidar com o problema de localização de facilidades em um mercado competitivo, considerando a dimensão ambiental. Os autores consideram tanto uma limitação de emissão de carbono (especificamente na entrega de produtos e serviços aos consumidores) quanto a possibilidade de comercializá-lo (*carbon trade*), e esclareceram que essa limitação pode estar associada a uma política (ou legislação) governamental e/ou a uma política interna da empresa. Assim, caso se exceda o limite máximo de emissões, torna-se necessário adquirir crédito de carbono. Já Xifeng, Ji e Peng (2013) propuseram uma modelagem matemática para localização de facilidades não-capacitadas que permite, ao mesmo tempo, minimizar os custos e emissões de CO₂ da rede e maximizar o nível de serviço oferecido ao cliente.

Vale lembrar, nesse ponto, que o objetivo principal da implantação de CILs consiste na promoção da intermodalidade, que viabiliza a utilização de modos de maior capacidade, auxiliando na redução dos custos logísticos totais de maneira mais sustentável, ao se considerar, por exemplo, a redução na emissão de carbono. Neste contexto, destaca-se o estudo de Guimarães (2018), que apresenta um modelo matemático multiobjetivo para localização de CILs abordando-se critérios econômicos e ambientais.

3. MODELO MATEMÁTICO DE LOCALIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE INTEGRAÇÃO

Nessa seção, descreve-se o modelo matemático proposto por Guimarães (2018) para a localização de CILs em que se deseja minimizar o custo total da rede, considerando tanto os custos financeiros de transporte e operação de um CIL, quanto os custos associados à emissão de CO₂.

Seja I um conjunto de pontos de produção, J um conjunto de pontos de consumo, P um conjunto de produtos, M um conjunto de modos disponíveis para transporte do produto $p \in P$ e K um conjunto de locais candidatos à abertura de CILs. Apresentam-se, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os demais conjuntos, índices, parâmetros e variáveis de decisão do modelo proposto por Guimarães (2018). Vale destacar que, embora o modelo permita avaliar o um conjunto P de produtos, este estudo se restringe à análise apenas da soja.

Tabela 1: Conjuntos, índices parâmetros e variáveis de decisão do modelo multiobjetivo de localização de CIL proposto por Guimarães (2018).

Notação	Descrição
M_{pij}^{dir}	Conjunto de modos disponíveis para transporte direto do produto $p \in P$ de um ponto de produção $i \in I$ a um ponto de consumo $j \in J$
M_{pik}^{ent}	Conjunto de modos disponíveis para transporte do produto $p \in P$ de um ponto de produção $i \in I$ a um CIL $k \in K$
M_{pkj}^{sai}	Conjunto de modos disponíveis para transporte do produto $p \in P$ de um CIL $k \in K$ a um ponto de consumo $j \in J$
C_{pijm}^{dir}	Custo unitário de transporte do produto $p \in P$ de uma origem $i \in I$ para um ponto de consumo $j \in J$ por um modo de transporte $m \in M_{pij}^{dir}$
C_{pikm}^{ent}	Custo unitário de transporte do produto $p \in P$ de uma origem $i \in I$ para um CIL $k \in K$ por um modo de transporte $m \in M_{pik}^{ent}$
C_{pkjm}^{sai}	Custo unitário de transporte do produto $p \in P$ de um CIL $k \in K$ para um ponto de consumo $j \in J$ por um modo de transporte $m \in M_{pkj}^{sai}$
CT_{pkjm}^{sai}	Custo do transbordo do produto $p \in P$ entre um CIL $k \in K$ e um ponto de consumo $j \in J$ para o modo de transporte $m \in M_{pkj}^{sai}$
g_k	Custo de abertura do candidato a CIL $k \in K$
v_{pk}	Custo de operação do candidato a CIL $k \in K$ pelo produto $p \in P$
V_k^{min}	Volume mínimo para abertura do candidato a CIL $k \in K$
V_k^{max}	Capacidade máxima para abertura do candidato a CIL $k \in K$
P_{pi}	Oferta máxima do produto $p \in P$ no ponto $i \in I$
d_{pj}	Demanda do produto $p \in P$ na zona $j \in J$
f_e	Fator de emissão do combustível usado pela alternativa de transporte $m \in M$
dt_{pijm}	Distância percorrida pela alternativa de transporte $m \in M$ entre as zonas de produção $i \in I$ e consumo $j \in J$ no transporte do produto p
dt_{pikm}	Distância percorrida pela alternativa de transporte $m \in M$ entre as zonas de produção $i \in I$ e o CIL k no transporte do produto $p \in P$
dt_{pkjm}	Distância percorrida pela alternativa de transporte $m \in M$ entre o CIL $k \in K$ e a zona de consumo $j \in J$ no transporte do produto $p \in P$
$x_{pijm}^{dir} \geq 0$	Volume do produto $p \in P$ transportado diretamente entre o ponto $i \in I$ e o ponto $j \in J$ por um modo $m \in M_{pij}^{dir}$
$x_{pikm}^{ent} \geq 0$	Volume do produto $p \in P$ transportado entre o ponto $i \in I$ e o candidato a CIL $k \in K$ por um modo de transporte $m \in M_{pik}^{ent}$
$x_{pkjm}^{sai} \geq 0$	Volume do produto $p \in P$ transportado entre o candidato a CIL $k \in K$ e o ponto $j \in J$ por um modo de transporte $m \in M_{pkj}^{sai}$
z_k	Variável binária que indica a abertura (assume 1) ou não (assume 0) do CIL $k \in K$
$y_{pikj} \geq 0$	Volume de produto $p \in P$ transportado de $i \in I$ para $j \in J$ que utiliza o candidato a CIL $k \in K$

Fonte: Adaptado de Guimarães (2018).

O modelo matemático multiobjetivo proposto por Guimarães (2018) é apresentado a seguir.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } v(\text{custos}) = & \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} C_{pijm}^{dir} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} C_{pikm}^{ent} x_{pikm}^{ent} \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left(g_k z_k + v_{pk} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} x_{pkjm}^{sai} \right) \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} (CT_{pkjm}^{sai} + C_{pkjm}^{sai}) x_{pkjm}^{sai}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } v(\text{emissões}) &= \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} f e_m dt_{pijm} x_{pijm}^{dir} + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} f e_m dt_{pikm} x_{pikm}^{ent} \\ &+ \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} f e_m dt_{pkjm} x_{pkjm}^{sai} \end{aligned} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{m \in M_{pij}^{dir}} x_{pijm}^{dir} + \sum_{k \in K} y_{pikj} &= d_{pij} & \forall p \in P, i \in I, j \in J & \quad (3) \\ v_k^{min} z_k &\leq \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} x_{pikm}^{ent} \leq v_k^{max} z_k & \forall k \in K & \quad (4) \\ \sum_{i \in I} y_{pikj} &= \sum_{m \in M_{pkj}^{sai}} x_{pkjm}^{sai} & \forall p \in P, k \in K, j \in J & \quad (5) \\ \sum_{j \in J} y_{pikj} &= \sum_{m \in M_{pik}^{ent}} x_{pikm}^{ent} & \forall p \in P, k \in K, i \in I & \quad (6) \\ x_{pijm}^{dir} &\geq 0 & \forall p \in P, i \in I, j \in J, m \in M_{pij}^{dir} & \quad (7) \\ x_{pikm}^{ent} &\geq 0 & \forall p \in P, i \in I, k \in K, m \in M_{pik}^{ent} & \quad (8) \\ x_{pkjm}^{sai} &\geq 0 & \forall p \in P, k \in K, j \in J, m \in M_{pkj}^{sai} & \quad (9) \\ y_{pikj} &\geq 0 & \forall p \in P, i \in I, k \in K, j \in J & \quad (10) \\ z_k &\in \{0,1\} & \forall k \in K & \quad (11) \end{aligned}$$

A Função Objetivo (1) busca minimizar o custo total do transporte na rede, alocando os fluxos para os CILs que forem abertos ou diretamente para as zonas de demanda. Consideram os custos operacionais destas estruturas e seus custos de transbordo. A Função Objetivo (2) busca minimizar as emissões de CO₂ nos sistemas de transportes. Percebe-se que se trata de um modelo multiobjetivo que visa minimizar tanto os custos totais da rede quanto a emissão de CO₂ proveniente do transporte direto e por intermédio do CIL. Reforça-se que o modelo não considera as emissões provenientes da estrutura de integração, tendo em vista que a única atividade nela desenvolvida é o transbordo.

As Restrições (3) garantem que a demanda total de cada zona de consumo será atendida somando-se o fluxo direto transportado de uma zona $i \in I$ para $j \in J$ com o fluxo que passa por um CIL $k \in K$. As Restrições (4) consideram o volume mínimo e a capacidade máxima para utilização de um candidato a CIL, impactando diretamente na decisão de abri-lo ou não. As Restrições (5) e (6) impõem que o volume total de um produto que deixa uma zona de produção e se destina a uma zona de consumo passando por um CIL seja exatamente igual ao volume total do produto que entra e sai no CIL tendo como origem a zona de produção. Garante, ainda, que as demandas par-a-par sejam respeitadas independente do CIL eventualmente utilizado. As demais restrições estão relacionadas ao domínio das variáveis de decisão.

Existem duas restrições que podem ser adicionadas ao modelo: a Restrição (12), que limita os investimentos na abertura de CILs caso haja restrição orçamentária; e a Restrição (13), caso se deseja definir uma quantidade máxima p de CILs abertos.

$$\sum_{k \in K} g_k \leq F \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K} z_k \leq p \quad (13)$$

Em que: F é o valor máximo disponível para o investimento e p é a quantidade máxima de CILs a serem abertos.

Cada parte da função objetivo pode ter um peso associado ao seu grau de importância no processo de planejamento estratégico do setor de transportes (α e β). Assim, o modelo multiobjetivo apresentado pode ser reescrito de forma mono-objetivo, conforme descrito a seguir. Para isso, a função objetivo referente às emissões necessita ser expressa em valores monetários (C_c):

$$\text{Min } v(\text{CIL ambiental}) = \alpha \times v(\text{custos}) + \beta \times v(\text{emissões}) \times C_c \quad (14)$$

Sujeito a: (3)-(13).

4. ESTUDO DE CASO

O desenvolvimento desse estudo de caso é composto pelas seguintes etapas: i) descrição; ii) elaboração de cenários de avaliação; e iii) aplicação e análise dos resultados.

4.1. Descrição do estudo de caso

A formulação matemática proposta por Guimarães (2018), descrita na Seção 3 e aplicada no estudo de caso desenvolvido neste artigo, foi modelada na linguagem *Xpress Mosel 5.0.0 FICO®* e resolvida com o *solver Xpress Optimizer 34.01.03 FICO®*.

Com o objetivo de determinar a localização ótima de CILs voltados exclusivamente para o transporte da soja brasileira, considerando critérios econômicos e ambientais, os dados foram obtidos a partir da base georreferenciada do PNLT (Ministério dos Transportes – MT, 2012), devido a sua relevância no planejamento de transporte e logística no Brasil. Assim, adotaram-se: (i) o mesmo zoneamento (558 microrregiões dentro do território nacional mais uma representando o exterior); (ii) a rede multimodal projetada para o ano 2031, que já considera os projetos de infraestrutura previstos no plano (Figura 1); e (iii) a matriz de produção e consumo da soja projetados para o ano 2031, com base nas expectativas de crescimento dos mercados interno e externo e no aumento de produtividade.

O transporte entre uma zona produtora e uma zona de consumo pode ser feito de duas maneiras: (i) diretamente pelo modo rodoviário, ou (ii) passando por um CIL, chegando nele pelo modo rodoviário e saindo por uma combinação intermodal (ferroviário e hidroviário, no caso da soja), sendo que durante essa parte do trajeto pode haver novas operações de transbordo (multimodalidade). Neste caso, o CIL é uma estrutura simplificada onde se realiza apenas o transbordo das mercadorias, sem armazenagem ou agregação de valor (sem estoque).

As matrizes de custo entre os pares de produção e consumo e as informações de custos fixos e variáveis dos CILs utilizados foram obtidos em Guimarães (2015). Diante da necessidade da utilização de fatores de emissões ambientais para os diferentes modos de transportes presentes no PNLT, buscou-se na literatura parâmetros de referência para fatores de emissão de CO₂ (EEA, 2012; CEFIC e ECTA, 2011; UNITED NATIONS, 2014; NIKANDER, 2008; DELFT, 2017). Para esse trabalho, adotou-se o valor médio entre os apresentados na bibliografia:

77,6 g/tkm para o rodoviário, 21,625 g/tkm para o ferroviário, 9,3 g/tkm para o marítimo; e 29,7 g/tkm para a navegação de interior. Para que as emissões fossem monetizadas, levantou-se a variação do preço do crédito de carbono (Investing.com, 2019a) para o período de três meses (compreendido entre os dias 01/03/2019 e 31/06/2019), verificando-se o valor médio de £ 24,42, equivalente a R\$ 125,30 (utilizando-se o valor cambial médio do mês de maio/2019, R\$ 5,13/£, segundo Investing.com, 2019b).

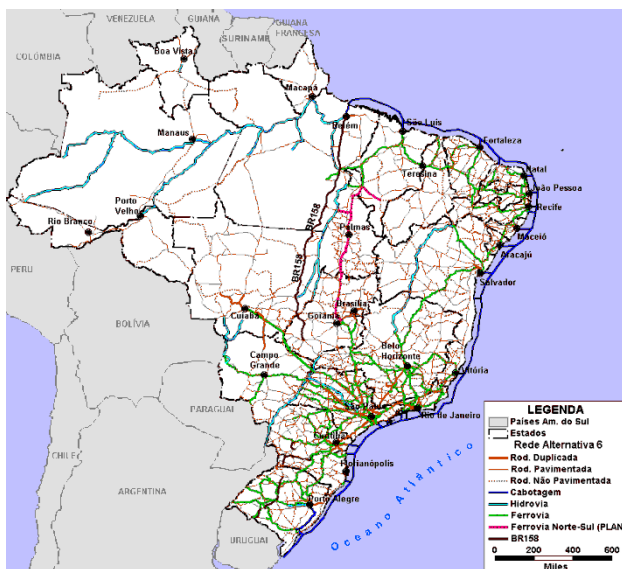


Figura 1: Rede de modelagem de transportes do PNLT – nacional. Fonte: MT, MD (2007).

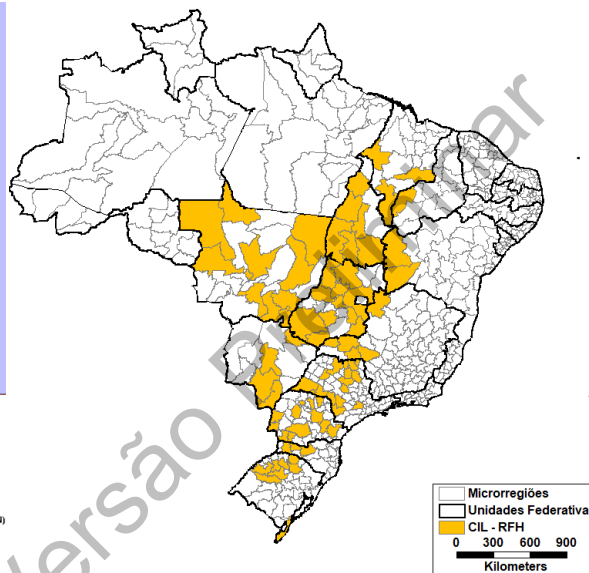


Figura 2: Microrregiões candidatas a construção do CIL

4.2. Cenários de avaliação

Inicialmente, foram pré-selecionadas 80 microrregiões que pudessem receber as instalações de um CIL, conhecidas como microrregiões candidatas (destacadas na Figura 2). Elas foram escolhidas por disporem de entroncamentos modais, ou seja, locais onde se possa efetivamente realizar o transbordo e a multimodalidade, além de estarem próximas às zonas de produção.

Para que a economia obtida com a abertura de CILs pudesse ser avaliada, fez-se necessário construir o cenário base de comparação “nada a fazer”, ou seja, sem instalações de CILs. Esse cenário foi denominado de Cenário 0. Cinco cenários foram estabelecidos ampliando-se os critérios para abertura dos CILs, conforme a seguinte orientação:

- **Cenário 1:** Os CILs possuem custo simbólico de abertura de R\$1,00, devido a sua importância estratégica na concepção da malha de transportes do país, e não possuem volume mínimo para sua abertura;
- **Cenário 2:** Similar ao Cenário 1, porém, agora, com volume mínimo de 1 milhão de toneladas a ser respeitado para abertura de um CIL;
- **Cenário 3:** Esse cenário considera que o custo para abertura de um CIL é 30 (3a) ou 100 (3b) milhões de reais, e que não há volume mínimo para sua abertura;
- **Cenário 4:** Similar ao Cenário 3, porém, agora, considerando o volume mínimo de 1 milhão de toneladas para abertura de um CIL; e
- **Cenário 5:** Similar ao Cenário 2, porém com limite superior de 11 CILs a serem abertos.

Vale destacar que os primeiros cenários permitem maior flexibilidade para a abertura dos CILs, podendo destoar da realidade, como, por exemplo, considerar baixos custos de abertura, indicando não haver limite para os gastos de implantação.

Em um primeiro ciclo de análises, considerou-se apenas a função objetivo com critério financeiro para a localização de CILs, adotando-se $\alpha = 1$ e $\beta = 0$ na função mono-objetivo (14). Em seguida, considerou-se a função objetivo que combina os critérios financeiros e ambientais (emissões ambientais) para a localização dos CLIs, adotando-se $\alpha = 1$ e $\beta = 1$ na função mono-objetivo (14).

4.3. Aplicação e análise dos resultados

O Cenário 0 não considerou abertura de CILs. Assim, com base nos dados obtidos, verificou-se que o custo financeiro deste cenário seria de aproximadamente R\$ 7,300 bilhões, enquanto a emissão de CO₂ foi estimada em R\$ 788 milhões, resultando em um custo total de R\$8,089 bilhões.

Os Cenários de 1 a 5 foram avaliados em dois ciclos de análise, como descrito na Seção 4.2. Os resultados obtidos para estes ciclos são sintetizados, respectivamente, na Tabela 2 e na Tabela 3. Ao comparar os cenários propostos com o Cenário 0, os resultados para o primeiro ciclo de análise apontam uma economia financeira da operação variando de 22% a 40% e redução nos custos de emissões de CO₂ variando de 24% a 33% quando se estimam os ganhos ambientais *a posteriori*, de acordo com as localizações propostas para os CILs, sem considerar a parte ambiental diretamente na função mono-objetivo. Já se observa, portanto, a importância econômica e ambiental da abertura de CILs, mesmo ao se considerar apenas as questões financeiras na função mono-objetivo para a localização ótima de CILs.

Quando se consideram os critérios financeiros e ambientais conjuntamente na função objetivo mono-objetivo ($\alpha = 1$ e $\beta = 1$), foram obtidos maiores ganhos com a redução de emissões ambientais (variando de 30% a 38%). Esses resultados reforçam a importância de se considerar as dimensões econômica e ambiental de forma conjunta para a abertura de CILs.

A função mono-objetivo propõe a abertura de 6 a 68 CILs para o primeiro ciclo de análise ($\alpha = 1$ e $\beta = 0$) e de 6 a 67 para o segundo ($\alpha = 1$ e $\beta = 1$). Ao comparar os resultados obtidos para cada cenário individualmente, observa-se que a quantidade de CILs selecionados para abertura variou apenas em uma unidade, mantendo-se próximas as economias financeiras aferidas pela primeira função objetivo, mas intensificando a redução das emissões ambientais aferidas pela segunda função objetivo. É importante ressaltar que, embora as quantidades de CILs para cada cenário nas duas avaliações sejam próximas, não significa necessariamente que se trata da abertura dos mesmos candidatos a CILs, mas sim uma nova escolha entre as microrregiões candidatas de forma a minimizar a função mono-objetivo.

Dentre os cenários avaliados, observou-se que os Cenários 1 e 2 apresentaram maior redução tanto para os custos quanto para as emissões em ambas as avaliações. Este efeito era esperado, uma vez que esses cenários não possuem características restritivas rígidas para abertura de CILs, resultando, inclusive, nos cenários com maiores quantidades de CILs abertos. Ao complementar as restrições do Cenário 2 com limite superior de 11 CILs proposição do Cenário 5, observou-se que os resultados foram limitados, porém, a modelagem ainda se comportou de forma funcional e eficiente.

Tabela 2: Resultados da avaliação dos cenários de abertura de CILs considerando a função mono-objetivo com $\alpha = 1$ e $\beta = 0$

Cenário	α	β	# CILs Abertos	FO1 (GUIMARÃES, 2015) R\$	Δ FO1	FO2 (Emissões) R\$	Δ FO2	Função Multiobjetivo R\$	Δ FM	Produtos Transportados Diretamente (toneladas)	Produtos Transportados por CIL (toneladas)
0	1	0	0	7.300E+09	-	7.883E+08	-	7.300E+09	-	8.59E+07	0
1	1	0	68	4.376E+09	-40%	5.289E+08	-33%	4.376E+09	-40%	2.89E+07	5.70E+07
2	1	0	37	4.474E+09	-39%	5.455E+08	-31%	4.474E+09	-39%	2.86E+07	5.73E+07
3a	1	0	11	5.098E+09	-30%	5.855E+08	-26%	5.098E+09	-30%	3.33E+07	5.26E+07
3b	1	0	6	5.671E+09	-22%	6.004E+08	-24%	5.671E+09	-22%	3.61E+07	4.98E+07
4a	1	0	11	5.098E+09	-30%	5.855E+08	-26%	5.098E+09	-30%	3.33E+07	5.26E+07
4b	1	0	6	5.675E+09	-22%	6.004E+08	-24%	5.675E+09	-22%	3.64E+07	4.95E+07
5	1	0	11	4.768E+09	-35%	5.855E+08	-26%	4.768E+09	-35%	3.33E+07	5.26E+07

Tabela 3: Resultados da avaliação dos cenários de abertura de CILs considerando a função mono-objetivo com $\alpha = 1$ e $\beta = 1$

Cenário	α	β	# CILs Abertos	FO1 (GUIMARÃES, 2015) R\$	Δ FO1	FO2 (Emissões) R\$	Δ FO2	Função Multiobjetivo R\$	Δ FM	Produtos Transportados Diretamente (toneladas)	Produtos Transportados por CIL (toneladas)
0	1	1	0	7.300E+09	-	7.883E+08	-	8.089E+09	-	8.59E+07	0
1	1	1	67	4.393E+09	-40%	4.903E+08	-38%	4.884E+09	-40%	3.07E+07	5.51E+07
2	1	1	36	4.498E+09	-38%	5.005E+08	-37%	4.998E+09	-38%	3.01E+07	5.58E+07
3a	1	1	12	5.110E+09	-30%	5.197E+08	-34%	5.629E+09	-30%	3.48E+07	5.11E+07
3b	1	1	6	5.677E+09	-22%	5.483E+08	-30%	6.225E+09	-23%	3.66E+07	4.93E+07
4a	1	1	12	5.110E+09	-30%	5.197E+08	-34%	5.629E+09	-30%	3.48E+07	5.11E+07
4b	1	1	7	5.708E+09	-22%	5.190E+08	-34%	6.227E+09	-23%	3.67E+07	4.92E+07
5	1	1	11	4.778E+09	-35%	5.217E+08	-34%	5.300E+09	-34%	3.49E+07	5.10E+07

Os Cenários 3 e 4 consideram custos para abertura de CIL variando entre R\$ 30 milhões (3a e 4a) e R\$ 100 milhões (3b e 4b). Na primeira avaliação, obtiveram-se a abertura de 11 CILs para ambas as alternativas, resultando em um custo de R\$ 0,33 bilhão para as alternativas “a” e R\$ 1,10 bilhões para as alternativas “b”. Já na segunda análise, foram selecionados 12 CILs, o que resultou em um custo de R\$ 0,36 bilhão para as alternativas “a” e R\$ 1,20 bilhões para as alternativas “b”.

Essas análises indicam que o estudo de abertura de CILs, principalmente ao considerar os aspectos ambientais, pode também favorecer a viabilidade econômico-financeira de projetos, dando suporte à tomada de decisões.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo aplicar o modelo matemático de localização de CILs proposto por Guimarães (2018) ao contexto brasileiro do transporte de soja, considerando a rede de transporte multimodal e as bases georreferenciadas estabelecidas pelo PNLT para o horizonte de 2031.

Em um primeiro momento, foram considerados apenas os aspectos financeiros na otimização da abertura de CILs. Posteriormente, foram considerados ambos os critérios financeiros e ambientais (emissões de CO₂). Em ambas as análises, o modelo matemático apresentou resultados satisfatórios, indicando as microrregiões candidatas ótimas para a abertura de CILs em cada um dos cenários. Ao comparar com o Cenário base (“nada a fazer”), observaram-se economias financeiras variando de 22% a 40% e redução das emissões ambientais de 24% e 38%.

Os resultados obtidos reforçaram a importância do estudo de implantação de CILs, permitindo a multimodalidade da rede, capaz de contribuir para o aumento da eficiência da operação dos sistemas logísticos. Além disso, demonstraram que os ganhos podem se estender do âmbito econômico para o ambiental, por meio da redução das emissões de CO₂, podendo auxiliar, por exemplo, no alcance das metas de redução de emissões estabelecidas em acordos internacionais. Indicam, ainda, que o estudo de localização de CILs pode subsidiar o processo de tomada de decisões e a elaboração de planos estratégicos.

Como limitação do estudo, esclarece-se que os resultados são altamente dependentes dos parâmetros de entrada, que precisam ser atualizados, caso seja necessário um estudo para direcionar investimentos públicos e privados. Ademais, foi considerado um único produto e não se aplicaram as restrições relacionadas à limitação das emissões e de investimentos.

Assim, como sugestões para trabalhos futuros, indicam-se: (i) a avaliação de outros produtos, além da soja (o que pode influenciar na complexidade de solução); (ii) a avaliação de cenários que restrinjam a quantidade de carbono que pode ser emitida (refletindo uma combinação da política *carbon tax* com a *carbon cap*); (iii) uma análise de sensibilidade sobre os pesos adotados para os critérios financeiros e ambientais, que possam indicar políticas ambientais mais restritivas a serem adotadas pelo governo; (iv) a expansão dos cenários que restringem o número de CILs para verificar o comportamento da rede; (v) a inclusão de uma restrição orçamentária para a abertura de CILs (além da variação dos custos de abertura, já proposta); (vi) a atualização dos parâmetros de entrada; e (vii) a consideração de outras externalidades, como, por exemplo, os impactos sociais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhattacharya, A., Kumar, S.A., Tiwari, M.K. et al. (2014). “An Intermodal Freight Transport System for optimal Supply Chain Logistics”, *Transportation Research Part C*, v.38, pp.73-84.
- Carneiro, R. C. (2016). Multimodalidade: conceitos, análises e limitações para o caso brasileiro. [Monografia]. Universidade de Brasília (UNB). Dep. Economia. 94p. Brasília/DF.
- Cefic, E. C. T. A. (2011). Guidelines for measuring and managing CO2 emission from freight transport operations. *Cefic Report*, 1(2011), 1-18.
- CNT (2018). Plano CNT de Transporte e Logística - 2018. Disponível em: <<http://planotransporte.cnt.org.br>>.
- CNT e COPPEAD (2002). “Transporte de Cargas no Brasil: Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País – Diagnóstico e Plano de Ação”. Rio de Janeiro/RJ.
- CONAB, 2019, Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2018/19 - Primeiro levantamento, v. 6, n. 1. Brasília.
- Costa, M.B.B. (2014). Utilização de modelo de localização-alocação para identificação de zoneamento logístico integrado ao planejamento estratégico de transportes. [Tese]. COPPE/UFRJ. Eng. Transportes. Rio de Janeiro
- EEA (2012). *GHG emissions of transport*, Transport and Energy Group, pp. 1–22.
- Flcury, P. F., Wanke, P. (2006). “Transporte de cargas no Brasil: estudo exploratório das principais variáveis relacionadas aos diferentes modais e às suas estruturas de custos”. In: *Estrutura e Dinâmica do Setor de Serviços no Brasil*.
- Ghaddar, B., Naoum-Sawaya, J. (2011). “Environmentally friendly facility location with market competition”, *Journal of the Operational Research Society*, v. 63, n. 7, pp. 899-908, 2011.
- Guimarães, V.A. (2015). Modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística considerando as demandas par-a-par. [Dissertação]. COPPE/UFRJ. Eng. Transportes. Rio de Janeiro/RJ.
- Guimarães, V.A. (2018). Localização-Alocação de Centros de Integração Logística Considerando Critérios Econômicos e Ambientais. [Qualificação de Tese]. COPPE/UFRJ. Eng. Transportes. Rio de Janeiro/RJ.
- Guimarães, V.A., Ribeiro, G.M., Azevedo-Ferreira, M. (2018). Mapping of the Brazilian scientific publication on facility location. *Pesquisa Operacional*, v. 38(2): 307-330.
- INVESTING.COM (2019a) Crédito Carbono Futuros - Dez 19 (CFI2Z9). Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em: 01/07/2019.
- INVESTING.COM (2019b) GBP/BRL - Libra Esterlina Real Brasileiro. Disponível em: <<https://br.investing.com/currencies/gbp-brl>>. Acesso em: 01/07/2019.
- Meisel, F., Kirschstein, T., Bierwirth, C. (2013). “Integrated production and intermodal transportation planning in large scale production-distribution-networks”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 60, pp. 62-78, 2013.
- Ministério dos Transportes – MT, Ministério da Defesa - MD (2007). Plano Nacional de Logística e Transportes: Sumário Executivo. Brasília.
- Ministério dos Transportes – MT.(2009). Relatório Executivo PNLT. Brasília.
- Ministério dos Transportes – MT.(2012) Projeto de reavaliação de estimativas e metas do PNLT: Relatório Final. Brasília., S. (2008). Greenhouse gas and energy intensity of product chain: case transport biofuel. Master's thesis. Helsinki University of Technology.
- Delft, C. E. (2017). *STREAM Freight Transport 2016 (in Dutch)*, Emissions of freight transport modes–Version 2, Publication code: 17.4 H29. 10.
- Rebelo, J. (2011), *Logística de Carga no Brasil: “Como reduzir Custos Logísticos e Melhorar Eficiência?”* World Bank, Sustainable Development Department, Latin America and the Caribbean Region.
- RENAI - A Rede Nacional de Informações sobre o Investimento (2018). *O Setor de Agronegócio no Brasil: Histórico e Evolução do Agronegócio Brasileiro*.
- SPNT, 2015, Centros de Integração Logística. Brasília/DF.
- United Nations (2014). Methodological tool: Baseline emissions for modal shift measures in inter-urban passenger transport. Report.
- Xifeng, T., Ji, Z., Peng, X. (2013). A multi-objective optimization model for sustainable logistics facility location, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 22, n. July 2013.

Conrado V. Plaza (conradoplaza@macae.ufrj.br)^{[1][3]}; Vanessa de A. Guimarães (vanessa.guimaraes@cefet-rj.br)^{[2][3]}, Gustav C. Skroder (gustav_skroder@poli.ufrj.br)^[3], Glaydston M. Ribeiro (glaydston@pet.coppe.ufrj.br)^[3], Laura S. B. da S. Leite (laura@cos.ufrj.br)^[3]

¹UFRJ/Macaé, Rua Aluizio da Silva Gomes, 50 – Novo Cavaleiros, Macaé/RJ, 27930-560;

²CEFET/RJ, Rua do Areal, 522, Sala 4D, Parque Mambucaba, CEP 23953-030, Angra dos Reis/RJ;

³UFRJ/Programa de Engenharia de Transportes, COPPE/UFRJ, Horácio Macedo, 2030 – Bloco H, Sala 106 – Cidade Universitária, Rio de Janeiro/ RJ, 21941-450