

LOCALIZAÇÃO-ALOCÇÃO DE CENTROS DE INTEGRAÇÃO LOGÍSTICA SUBMETIDOS A DEMANDAS PAR-A-PAR

Vanessa de Almeida Guimarães, Glaydston Mattos Ribeiro, Abilio Lucena
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
Av. Horácio Macedo, 2030, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro – RJ. CEP 21941-914
Emails: {vanessaguimaraes, glaydston}@pet.coppe.ufrj.br / abiliolucena@cos.ufrj.br

Vinicius Leal do Forte
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Instituto de Ciências Exatas
BR-465, Km 7, Seropédica, Rio de Janeiro – RJ. CEP 23.890-000
email: vlforte@ufrj.br

**Artur Monteiro Leitão Junior, Luiz Carlos de Souza Neves Pereira, Francielle Avancini
Fornaciari**
Ministério dos Transportes
Bloco R Ed. Anexo, Ala Oeste, 4º Andar, Brasília – DF. CEP 70.044-902
Emails: {artur.junior, luiz.pereira, francielle.fornaciari}@transportes.gov.br

RESUMO

O planejamento estratégico do setor de transportes brasileiro aponta para a necessidade de instalação de Centros de Integração Logística – CILs. Isso é feito visando promover a intermodalidade e consequentemente aumentar tanto a eficiência do setor quanto a competitividade do país. Este trabalho investiga o uso de um modelo matemático de localização-alocação para o problema. O modelo se baseia no atendimento explícito de demandas par-a-par e na minimização dos custos logísticos envolvidos. Foi testado numa instância envolvendo quatro produtos economicamente relevantes e utilizando a base de dados georeferenciada do Plano Nacional de Logística e Transportes, estimada para o ano de 2023. Os resultados obtidos propõem a abertura de 10 CILs, reduzindo custos de transporte e gerando ganhos de eficiência para o setor como um todo.

Palavras-chave: otimização, centros de integração logística, planejamento de transporte.

Área principal: L&T – Logística e Transportes.

ABSTRACT

Strategic planning for the Brazilian transportation sector highlights the need for setting up Logistics Integration Centers – LICs so as to promote intermodal transportation and, as a result, obtain efficiency gains and improved competitiveness for the country. This paper investigates the use of a location-allocation mathematical model for the problem that takes into account peer-to-peer demands and minimizes total logistics costs. A case study was conducted for the model, using the geo-referenced data base of the Brazilian National Logistics and Transportation Plan, as estimated for the year 2023, and four relevant products for the Brazilian economy. As a result, the model suggests the opening of 10 LICs, thus reducing transportation costs and enhancing the efficiency of the transportation sector as whole.

Key words: optimization, logistics integration centers, transportation planning.

Main Area: L&T – Logística e Transportes.

1. Introdução

A dimensão territorial do Brasil aliada à dispersão geográfica de suas atividades produtivas faz com que o setor de transportes tenha fundamental importância para o desenvolvimento econômico das mais diversas regiões produtoras e consumidoras do país (CNT e COPPEAD, 2002; Fleury, 2003; Diniz, 2006). Enfatizando esse ponto, Padula (2008) destaca que a infraestrutura de transportes é essencial para integração entre os mercados produtores e consumidores, internos e/ou externos, e que um aumento de eficiência neste setor se propaga por toda a cadeia produtiva.

A baixa eficiência do setor de transportes brasileiro pode ser constatada, dentre outros, pelo fato do custo logístico representar de 10,6% a 15,4% do valor do PIB nacional, comparado aos 8,5% relativos aos Estados Unidos (CNT, 2014). Disto resulta, em parte, o chamado “Custo Brasil”, calculado com base nas restrições legais, institucionais, burocráticas e de infraestrutura que condicionam as atividades econômicas e sociais e que limitam o crescimento econômico (CNT, 2014).

Motivado pelo exposto acima, o planejamento estratégico do setor de transporte de cargas brasileiro tem se focado na redução de custos, o que levaria a um aumento de competitividade para o país. Nesse sentido, programas do governo federal, como o Plano Nacional de Logística e Transporte – PNLT (MT, 2007, 2009, 2012), apontam para o uso de intermodalidade e sugerem ações para equilibrar a matriz de transporte de cargas do país. Tais ações, por sua vez, levariam à almejada redução de custos, com a utilização de modos de transporte de maior capacidade. Entretanto, para se alcançar a intermodalidade é necessário implantar, dentre outros, estruturas de integração logística, como os Centros de Integração Logística (CILs) que iremos aqui investigar.

Neste estudo utilizamos o modelo matemático de localização e dimensionamento de CILs proposto por Guimarães (2015). O modelo minimiza custos logísticos considerando explicitamente os fluxos de carga entre origens e destinos, definidos por demandas par-a-par. Para testar a adequação do modelo, experimentos computacionais foram efetuados restringindo a localização de CILs ao território nacional e considerando apenas o transporte de quatro produtos agrícolas. A saber, soja, açúcar, farelo e milho, que figuram entre os principais produtos do agronegócio brasileiro (MA, 2015) e envolvem volumes de carga expressivos (MT, 2007). Como uma delimitação adicional ao estudo, ressalta-se que utilizamos a base de dados georreferenciada do PNLT, estimada para o ano de 2023 (MT, 2007), e também as projeções da infraestrutura de transportes por ele sugeridas.

Além desta introdução, o artigo contém cinco seções adicionais. Na Seção 2 é descrita a relação entre planejamento de transportes e estruturas de integração logística. Em seguida, na Seção 3, é apresentado o modelo matemático utilizado. A definição dos parâmetros do modelo é feita na Seção 4. Por sua vez a análise dos dados de entrada e os resultados computacionais obtidos são discutidos na Seção 5. Finalmente, conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentados na Seção 6.

2. O planejamento de transporte e sua relação com estruturas de integração

A eficiência do transporte de cargas no Brasil pode ser melhorada, segundo Lopes *et al.* (2008). Para tanto, o planejamento estratégico do setor deve se focar na redução dos custos de movimentação de carga. O relatório da CNT (2014) destaca que algumas lacunas encontradas no planejamento e desenvolvimento de um sistema de transporte integrado para o país têm gerado desequilíbrios na matriz de transporte brasileira. Isto, por sua vez, tem levado ao aumento dos custos de movimentação de cargas, impactando assim na competitividade do país e aumentando o Custo Brasil.

Neste sentido, diferentes planos e programas federais e estaduais foram lançados ao longo das duas últimas décadas, sinalizando a necessidade de investimentos específicos em infraestrutura de transporte (ampliação ou implantação). Dentre estes, destacamos o PNLT, lançado em 2007 e revisado em 2009 e 2011, que fomenta a intermodalidade e o

reequilíbrio da matriz de transporte de cargas ao combinar as eficiências de diferentes modos de transporte (MT, 2007, 2009 e 2012). Trata-se de um plano com características de Plano Plurianual que estima as matrizes de produção e consumo brasileiras para diferentes tipos de produtos (para os anos de 2015, 2019, 2023, 2027 e 2031) e sugere intervenções de infraestrutura visando alcançar o reequilíbrio da matriz de transportes. Correa e Ramos (2010), Fleury (2011), Costa (2014), e Quadros e Nassi (2015) apontam para o PNLT como a retomada do planejamento estratégico no setor de transportes brasileiro, após um longo período de falta de investimentos coordenados e de integração sistêmica.

Para que se possa usufruir da intermodalidade são necessários CILs, ou seja, estruturas de integração logística. Estas podem variar em complexidade, indo de terminais de transbordo simplificados até plataformas logísticas que permitem a agregação de valor aos produtos movimentados (Guimarães, 2015). Entretanto, para que levem de fato a uma redução de custos, torna-se necessário bem localizar os CILs, em pontos estratégicos do território nacional.

Sirikijpanichkul e Ferreira (2005) ressaltam que a adequada localização de terminais é essencial para o sucesso do transporte de cargas intermodal. Da mesma forma, Daskin *et al.* (2003) consideram-na crítica também para a eficiência da cadeia de suprimentos, uma vez que decisões sobre transporte e formação de estoque são estratégicas para o desempenho empresarial. Acrescente-se a isso o fato de que mudar a localização de um terminal é algo que requer tempo (estratégia de longo prazo) e recursos financeiros, além de gerar inconveniências para os clientes (Slack *et al.*, 2009). Devido à complexidade de bem localizar e dimensionar CILs, modelos matemáticos e algoritmos de solução, em particular aqueles associados à Otimização Matemática, são então fundamentais para cumprir a tarefa.

Na literatura encontramos estudos sobre a localização de *hubs* intermodais, ou seja, um dos possíveis tipos de CILs (Arnold *et al.*, 2004; Groothedde *et al.*, 2005; Racunica e Wynter, 2005; Almur e Kara, 2008; Limbourg e Jourquin, 2009; Ishfaq e Sox, 2011; Almure *et al.*, 2012; Campbell e O'Kelly, 2012; Farahani *et al.*, 2013). Além disso, encontramos também estudos sobre localização de terminais intermodais, tais como: Crainic e Laporte (1997), Bhattacharya *et al.* (2014), e Sirikijpanichkul e Ferreira (2005). Considerando apenas a etapa de alocação, podemos citar o trabalho de Meisel *et al.* (2013), que considera restrições de capacidade para os pontos de origem e envolve decisões sobre o transporte intermodal de uma cadeia de suprimentos (terminais de transbordo definidos a priori).

Especificamente para localização-alocação, destacamos três modelos: Dubke (2006), Costa (2014) e Guimarães (2015). Dubke (2006) propõe um modelo matemático de localização-alocação de terminais logísticos, aplicando-o ao escoamento da soja brasileira. A autora considera agregação de valor à soja. Ou seja, trabalha com um produto de entrada no CIL – soja a granel – e três produtos de saída – soja, farelo e óleo de soja. Entretanto, não são consideradas demandas par-a-par, como desejado pelo Ministério dos Transportes.

O modelo de Costa (2014) define locais para a implantação de CILs, dadas as configurações da rede de transporte conectando pontos de produção a pontos de consumo. Entretanto, ele permite que demandas distintas de um mesmo produto sejam eventualmente combinadas dentro de um CIL, não respeitando assim o atendimento explícito das demandas par-a-par. O trabalho de Guimarães (2015), por sua vez, refina o trabalho de Costa (2014) ao impor o atendimento explícito das demandas par-a-par. Posto isto, este foi o modelo selecionado para a investigação aqui conduzida, que é descrita em detalhes na Seção 3. Finalmente, ao concluir esta seção, indicamos o texto de Melo *et al.* (2009) para uma resenha sobre a área de investigação aqui considerada.

3. Modelagem matemática do problema de localização-alocação de CILs

Com base no modelo desenvolvido por Costa (2014), Guimarães (2015) propôs um modelo que respeita as demandas par-a-par. Estas, por sua vez, aparecem identificadas nas

matrizes de origem-destino de carga do PNL. Ou seja, se um determinado produto deve deixar um local de produção e chegar a um local de consumo específico, existe então uma relação biunívoca entre o que é enviado e o que é recebido, não sendo permitidas alterações de qualquer espécie ao longo do trajeto. Isto se aplica mesmo que o deslocamento envolva a utilização de uma estrutura concentradora de carga, do tipo CIL.

Tal característica do modelo de Guimarães (2015) o torna aderente a uma realidade econômica em que: (1) fornecedores de bens e serviços preocupam-se em atender clientes específicos e/ou a respeitar contratos já estabelecidos; e (2) pode haver relação de confiança entre produtores e consumidores, não estando os clientes dispostos a ter sua demanda satisfeita por outros fornecedores.

Para descrever o modelo, seja I um conjunto de pontos de produção, J um conjunto de pontos de consumo, P um conjunto de produtos e K um conjunto de locais candidatos à abertura de CILs. Temos então os seguintes parâmetros:

- M_{pi}^{dir} : conjunto dos modos disponíveis para transportar diretamente o produto $p \in P$ do ponto de produção $i \in I$ para qualquer ponto consumidor $j \in J$;
- M_{pi}^{ent} : conjunto de modos disponíveis para transportar o produto $p \in P$ do ponto de produção $i \in I$ para qualquer CIL $k \in K$;
- M_{pk}^{sai} : conjunto de modos disponíveis para transportar o produto $p \in P$ do CIL $k \in K$ para qualquer ponto de demanda $j \in J$;
- C_{pijm}^{dir} : custo unitário de transporte do produto $p \in P$ da zona de produção $i \in I$ para o ponto de consumo $j \in J$, de maneira direta pelo modo de transporte $m \in M$, ou seja, sem a utilização do CIL;
- C_{pikm}^{ent} : custo unitário de transporte do produto $p \in P$ da zona de produção $i \in I$ para o CIL $k \in K$, pelo modo de transporte $m \in M_{pi}^{ent}$;
- C_{pkjm}^{sai} : custo unitário de transporte do produto $p \in P$ do CIL $k \in K$ até a zona de consumo $j \in J$, pelo modo de transporte $m \in M_{pk}^{sai}$;
- CT_{pkjm}^{sai} : custo do(s) transbordo(s) do produto $p \in P$, entre o CIL $k \in K$ e a zona de consumo $j \in J$ para o modo $m \in M_{pk}^{sai}$. Este custo está relacionado à troca modal proporcionada pelo CIL, tendo em vista que mais de uma troca modal pode ser feita ao longo do trajeto entre k e j , desde que proporcione redução no custo de transporte;
- g_{pk} : custo fixo de utilização do CIL $k \in K$ pelo produto $p \in P$;
- v_{pk} : custo variável de utilização do CIL $k \in K$ pelo produto $p \in P$;
- v_k^{min} : representa o volume mínimo para abertura do CIL $k \in K$;
- v_k^{max} : representa o volume máximo para abertura do CIL $k \in K$; e
- d_{ipj} : refere-se à quantidade total do produto $p \in P$ demandada pela zona de consumo $j \in J$, proveniente da zona de produção $i \in I$.

Por sua vez, as variáveis do modelo são descritas por:

- x_{pijm}^{dir} : volume do produto $p \in P$ transportado diretamente do ponto de produção $i \in I$ até o ponto de consumo $j \in J$ pelo modo $m \in M_{pi}^{dir}$;
- x_{pikm}^{ent} : volume do produto $p \in P$ transportado do ponto de produção $i \in I$ até o CIL $k \in K$ pelo modo $m \in M_{pi}^{ent}$ (representa fluxo de entrada de produtos no CIL);
- x_{pkjm}^{sai} : volume do produto $p \in P$ transportado do CIL $k \in K$ até o ponto de consumo $j \in J$ pelo modo $m \in M_{pk}^{sai}$ (representa o fluxo de saída do CIL);
- z_k : variável binária que indica se o CIL $k \in K$ deve ser aberto ($z_k=1$) ou não ($z_k = 0$);
- Y_{ipkj} : refere-se ao volume de produto $p \in P$ transportado de $i \in I$ para $j \in J$, que utiliza o CIL $k \in K$. Trata-se de uma variável de decisão que garante que as demandas par-a-par sejam respeitadas, ou seja, que determinado produto $p \in P$ demandado por

$j \in J$ de uma zona $i \in I$ específica, será atendida por esta zona, mesmo se qualquer CIL $k \in K$ que estiver aberto.

O modelo de Programação Inteira Mista proposto para o problema tem então a seguinte formulação:

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

Sujeito a:

$$\begin{aligned}
 \sum_{m \in M_{pi}^{dir}} x_{pijm}^{dir} + \sum_{k \in K} Y_{pikj} &= d_{pij} & \forall p \in P, i \in I, j \in J & \tag{2} \\
 V_k^{min} z_k \leq \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_{pi}^{ent}} x_{pikm}^{ent} \leq V_k^{max} z_k & & \forall k \in K & \tag{3} \\
 \sum_{j \in J} Y_{ipkj} &= \sum_{m \in M_{pi}} x_{pikm}^{ent} & \forall i \in I, p \in P, k \in K & \tag{4} \\
 \sum_{i \in I} Y_{ipkj} &= \sum_{m \in M_{pk}} x_{pkjm}^{sai} & \forall j \in J, p \in P, k \in K & \tag{5} \\
 x_{pijm}^{dir} &\geq 0 & \forall p \in P, i \in I, j \in J, m \in M_{pi}^{dir} & \tag{6} \\
 x_{pikm}^{ent} &\geq 0 & \forall p \in P, i \in I, k \in K, m \in M_{pi}^{ent} & \tag{7} \\
 x_{pkjm}^{sai} &\geq 0 & \forall p \in P, k \in K, j \in J, m \in M_{pk}^{sai} & \tag{8} \\
 Y_{pikj} &\geq 0 & \forall p \in P, i \in I, k \in K, j \in J & \tag{9} \\
 z_k &\in \{0,1\} & \forall k \in K & \tag{10}
 \end{aligned}$$

A função objetivo (1) minimiza os custos de transporte, considerando para tanto os custos de transporte direto e aqueles envolvendo o uso de CILs. Leva em conta também os custos operacionais (fixos e variáveis) destas estruturas e seus custos de transbordo. As restrições (2) garantem que a demanda total de cada zona de consumo será atendida, seja por transporte direto entre a zona de produção e a de consumo, seja passando por um CIL. Garante também que, independente do CIL eventualmente utilizado, as demandas par-a-par serão respeitadas. As restrições (3) estão relacionadas às capacidades máximas e mínimas de utilização de CILs e impactam diretamente na decisão de abri-los ou não. As restrições (4) 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 será exatamente igual ao volume total do produto que entra no CIL tendo como origem a zona de produção. Isso significa dizer que todo o volume de um dado produto que entra no CIL já tem, de antemão, uma destinação específica, não podendo ser usado para atender a demanda de outra zona de consumo. As restrições (5) complementam as restrições (4) e são associadas aos fluxos de saída. As demais restrições estão relacionadas ao domínio de definição das variáveis.

Vale aqui ressaltar que devido principalmente à exigência do atendimento explícito das demandas par-a-par o problema, que é NP-difícil e eminentemente estratégico, agrega também características de um problema tático.

4. Especificação detalhada de alguns parâmetros e dados de entrada do modelo

Para testar o modelo da Seção 3, utilizamos os seguintes dados de entrada:

- 1- O território brasileiro foi dividido em 559 zonas de produção e consumo (microrregiões) e acrescido de uma zona no exterior, de acordo com os critérios definidos pelo PNLT (MT, 2007);
- 2- Foi utilizada a rede de transportes e a base de dados georreferenciada do PNLT para o ano de 2023. Para tanto, foram identificadas as conexões intermodais (rodoviário, hidroviária e/ou ferroviária) e os terminais de transbordo (que possibilitam a intermodalidade);
- 3- Foram selecionados quatro produtos para o experimento (vide Seção 1): soja, farelo de soja, milho e açúcar. Tais produtos pertencem ao Grupo 1 (categorizado na revisão do PNLT de 2012), sendo estes os de maior potencial de intermodalidade (MT, 2012; Guimarães, 2015), no grupo. Feita a escolha, compilamos suas matrizes de produção e consumo estimadas para o ano de 2023 pelo PNLT (MT, 2007);
- 4- Como custos associados aos CILs, consideramos um custo fixo de utilização e um custo variável, por volume processado. Estes foram estimados através de dados coletados das seguintes fontes: BNDES (2011), ANTT (2012 *apud* Costa 2014), USP (2012), ANTAq (2013), CONAB (2013 *apud* Costa 2014), e COSTA (2014);
- 5- Para efeito da aplicação, os CILs foram considerados terminais de transbordo simplificados, ou seja, permitem apenas a consolidação e a transferência modal. Não trazem, portanto, agregação de valor ou qualquer serviço adicional;
- 6- Considerou-se 1.000.000 toneladas como o volume mínimo exigido para abertura de um CIL, conforme Costa (2014). O volume máximo permitido foi deixado livre, já que depende da capacidade ociosa de ferrovias e hidrovias;
- 7- Não consideramos custos fixos de instalação, tendo em vista enfatizar um viés de planejamento estratégico de transportes sob uma ótica governamental, pressupondo, então, que o governo instalaria a estrutura independente de seu custo; e
- 8- Foram pré-selecionadas regiões potenciais para instalação de CILs. Para tanto, considerou-se: (i) a existência de entroncamentos modais que possibilitassem a intermodalidade; e (ii) regiões previstas para concentrar, em 2023, 80% da oferta dos quatro produtos selecionados (MT, 2007; Costa, 2014). Ao final, 80 microrregiões foram escolhidas como candidatas à instalação de CILs. Vale notar que proximidade das zonas de produção (potenciais clientes do CIL) foi considerada, ainda que indiretamente, neste processo de seleção. Isto, por sua vez, está em consonância com as sugestões propostas por Chopra e Meindl (2011).

Destaca-se que, para efeito de simplificação, considerou-se que o transporte de determinado produto de uma zona de produção para uma zona de consumo tem, em geral, dois tipos de caminhos possíveis: (i) a transferência direta entre a origem e o destino, feita exclusivamente pelo modo rodoviário; e (ii) transporte através de um CIL, chegando a ele exclusivamente pelo modo rodoviário e de lá saindo por um modo distinto.

5. Apresentação e discussão dos dados

Um código na linguagem C++ foi escrito para gerar uma entrada de dados para o *software* de Programação Inteira Mista IBM ILOG CPLEX 12.6, relativos ao modelo matemático da Seção 3 e à instância descrita na Seção 4. Deste processo resultou uma quantidade excessiva de variáveis e de restrições, impossibilitando a resolução direta do modelo pelo *software*, em um computador com os seguintes atributos: processador Intel Xeon 3.16 Ghz, 8 Gbits de memória RAM e sistema Operacional Ubuntu 12.04.5 LTS. Procedemos então a um pré-processamento do modelo visando eliminar variáveis e restrições redundantes ou irrelevantes, conforme descrito a seguir:

- a) Foram eliminadas todas as variáveis x_{pijm}^{dir} , x_{pikm}^{ent} , x_{pkjm}^{sai} e Y_{pikj} que não estivessem associadas a uma demanda par-a-par; e

- b) Se o custo de transporte direto de um produto entre a zona de produção e a de consumo é menor que o custo de transporte via CIL, descarta-se então a segunda opção.

Finalmente, vale notar que um produto não será necessariamente transportado pelo candidato a CIL que lhe é mais favorável. Este, eventualmente, pode não vir a ser aberto. Os resultados obtidos no pré-processamento são descritos no Quadro 1.

Quadro 1: Comparação do número de variáveis do modelo com e sem pré-processamento

Variáveis	Original	Com pré-processamento
x_{pijm}^{dir}	1.249.924	46.362
x_{pikm}^{ent}	178.880	7.265
x_{pkjm}^{sai}	178.880	7.912
Y_{pikj}	99.993.920	28.605
Z	80	80
Tempo de solução com o CPLEX	Não resolvido	0,4 segundos



Figura 1: Localização geográfica dos CILs indicados para abertura

O modelo (1)–(10), sob os parâmetros e dados de entrada sugeridos na Seção 4, propõe a abertura de 10 (dez) CILs. Suas localizações geográficas estão indicadas na Figura 1. Nota-se que, com exceção das microrregiões de Santa Maria de Vitória – BA e Ituiutaba – MG, todas as demais localidades sugeridas se concentram na região Centro-oeste, o que pode ser explicado pela proximidade com as zonas de produção (conforme MT, 2007). São movimentadas, ao todo, mais de 42 milhões de toneladas (t), representando a soja 45% do volume total transportado, seguida pelo milho (23%), pelo farelo (22%) e pelo açúcar (10%). A distribuição dos volumes totais movimentados por CIL é descrita na Figura 2.

Verifica-se que o CIL com o maior processamento de carga é o da microrregião de Aripuana, representando 45,1% do volume total transportado através de CILs. A seguir temos: Quirinópolis e Rondonópolis, com 12,2% e 11%, respectivamente. As demais estruturas têm um volume de movimentação abaixo de 4 milhões de t. Destaca-se que os CILs das microrregiões de Ituiutaba, Araguaia e Anápolis movimentam exatamente a quantidade mínima exigida para implantá-los, processando, cada um deles, 2,4% do volume total transportado por CILs.

Relativo ao *mix* de produtos processados por cada CIL, a Figura 3 indica os percentuais transportados através de cada um deles. A soja é o produto com maior movimentação nos CILs das microrregiões definidas por Santa Maria da Vitória (60,3%),

Itaiatuba (92,5%), Aripuana (68,5%) e Quirinópolis (37,8%). O milho, por sua vez, se destaca em Alto Teles Pires (63%) e Anápolis (38,5%) enquanto o farelo é o produto mais representativo em Cuiabá (85,8%), Rondonópolis (81,5%) e Alto Araguaia (69,2%). Já o açúcar é o produto que se destaca no CIL da microrregião de Norte Araguaia (45%).

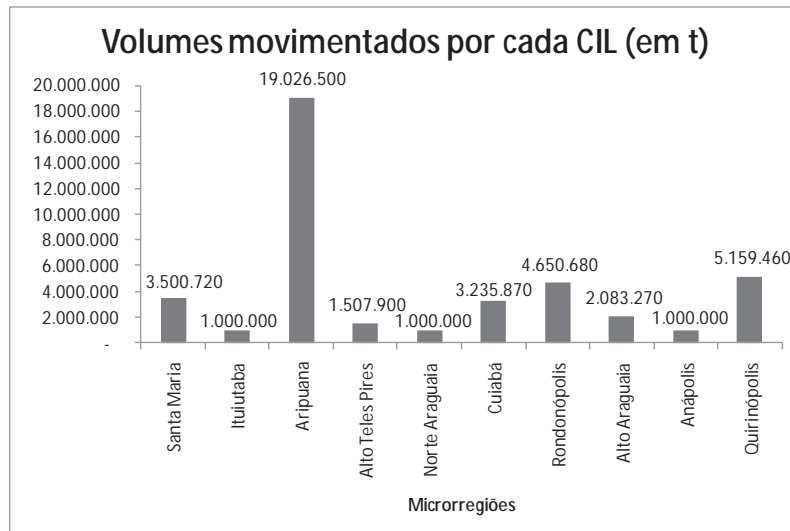


Figura 22: Distribuição da movimentação por CIL

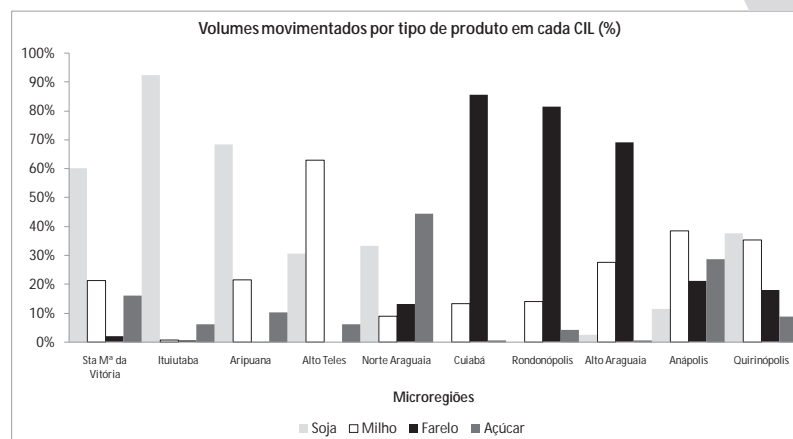


Figura 3: Volume percentual de movimentação de cada produto nos CILs abertos

O CIL da microrregião de Ituiutaba é quase exclusivamente dedicado à soja, processando apenas 6,2% de açúcar, 0,7% de milho e 0,6% de farelo. Em contrapartida, os CILs de Quirinópolis e Anápolis têm um processamento de carga mais equilibrado, sendo, respectivamente, de: 37,8% e 11,6% para soja; 35,3% e 38,5% para milho; 18,1% e 21,1% para o farelo de soja; e, 8,9% e 28,1% para o açúcar. Embora a soja represente 45% do volume transportado, ela não é processada pelo CIL da microrregião de Rondonópolis e representa apenas 0,004% do volume processado pelo CIL de Cuiabá.

O farelo de soja, por sua vez, tem processamento reduzido nos CILs de Santa Maria da Vitória (2%), Ituiutaba (0,6%) e Aripuana (0,1%), não havendo processamento deste produto em Alto Teles Pires. O milho tem processamento em todos os CILs, definindo o menor percentual processado em Ituiutaba (0,7%) e o maior em Alto Teles Pires (63%). O açúcar também é processado por todos os CILs, representando 0,7% do processamento em Alto Araguaia e 0,8% em Cuiabá e, no outro extremo, 44% em Norte Araguaia.

Destaca-se que, embora determinado produto possa vir a ter baixa participação percentual em um dado CIL, é importante analisar também seu volume de toneladas

processadas, pois este pode ser eventualmente expressivo em relação ao total para o produto. Por exemplo, a movimentação de açúcar em Aripuana representa apenas 10,3% (equivalente a aproximadamente 2 milhões de t) do processamento total do CIL. Entretanto, o volume de açúcar processado pela estrutura é superior ao total movimentado pelos CILs de Ituiutaba (1 milhão de t), Alto Teles (mais de 1,5 milhões de t), Norte Araguaia (1 milhão de t) e Anápolis (1 milhão de t).

Além disso, é importante estimar a redução de custos proporcionada pela “abertura” dessas estruturas. Verificou-se que o custo total de transporte a elas associado é de 7,4 bilhões de reais. Deste total, 37% estão relacionados ao transporte da soja (que representa 45% do volume total), 26% ao milho, 23% ao farelo de soja e 14% ao açúcar.

Nota-se que a distribuição percentual dos custos converge com a participação de cada produto na movimentação total, sendo que os produtos com maior movimentação representam a maior parcela de desembolso. Entretanto, o maior custo por tonelada movimentada é o do açúcar (R\$ 252,02), seguido pelo milho (R\$ 202,57), farelo de soja (R\$ 182,92) e soja (R\$ 143,81). Destaca-se que o custo unitário médio de movimentação é de R\$176,60/t, sendo a movimentação soja, portanto, mais eficiente.

Os custos totais (considerando os quatro produtos selecionados) associados à movimentação por CIL em cada uma das microrregiões consideradas variam de R\$ 126 milhões em Ituiutaba a R\$ 2,9 bilhões em Aripuana (valor 23,1 vezes maior). Destaca-se que os três CILs com maior movimentação (68% do total acumulado), foram também aqueles que mais contribuíram para o custo total, sendo: 39,3% para Aripuana, 12,5% para Quirinópolis e 11,1% para Rondonópolis.

Contudo, como este estudo está voltado para uma análise estratégica, é importante avaliar também a economia total proporcionada por cada CIL, bem como relacioná-la aos custos do transporte efetuado através destas estruturas. O custo total de transporte considerando fluxos diretos e aqueles via CILs foi de R\$ 25,187 bilhões, sendo 29,6% referentes ao transporte via CILs. Destaca-se que a economia obtida pelo uso destas estruturas é de R\$ 1,61 bilhão, sendo esta equivalente a 22% dos custos de transporte através dos CILs e 6% do total.

O CIL com o maior volume de economia global é o de Aripuana - MT (84,3% do total), seguido por Santa Maria da Vitória - BA (3,9%) e Norte Araguaia - MT (3,2%). A economia dos demais CILs varia de 0,4% em Alto Araguaia - MT a 2,2% em Anápolis - GO. A relação existente entre custos e economias correspondentes a cada CIL é apresentada na Figura 4. Ressalta-se que as economias são obtidas ao trocarmos o transporte direto pelo transporte via CIL. Além disso, por si só, a economia proporcionada pelo CIL da microrregião de Aripuana seria suficiente para viabilizar, financeiramente, a utilização do CIL de Quirinópolis (o de segundo maior custo) e de qualquer outro CIL com custo inferior a R\$ 426 milhões.

Percebe-se então que o modelo de Guimarães (2015) permite indicar as regiões de abertura dos CILs (localização), a quantidade de cada tipo de produto a processar (alocação), seus custos de transporte e a economia advinda da utilização deste tipo de estrutura. Isto é fundamental para o planejamento estratégico de transportes, pois permite determinar com certo grau de precisão a capacidade adequada de um CIL para atender a cada tipo de produto a ele associado (caso os dados utilizados sejam confiáveis e desconsiderando-se as variações mercadológicas sobre as quais os gestores não têm poder de influência). Permite ainda que se faça uma definição mais precisa dos atributos de um CIL, a saber, quantidade e tipos de equipamentos necessários, layouts, tipos de estruturas de armazenagem e respectivas capacidades, dentre outros.

Além disso, o modelo auxilia também na determinação dos critérios necessários para o desenvolvimento do plano de negócios da estrutura e nos estudos de viabilidade técnica, financeira, econômica e ambientais - EVTEAs. Ressalta-se, entretanto, que os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo variam de acordo com a base de dados utilizada.

Dessa forma, os resultados que obtivemos neste trabalho podem ser considerados os melhores possíveis, diante da base de dados selecionada para a aplicação. Entretanto, um refinamento da mesma pode levar a resultados ainda mais precisos e eventualmente distintos dos atuais, indicando, por exemplo, localidades diferentes para a instalação de CILs.

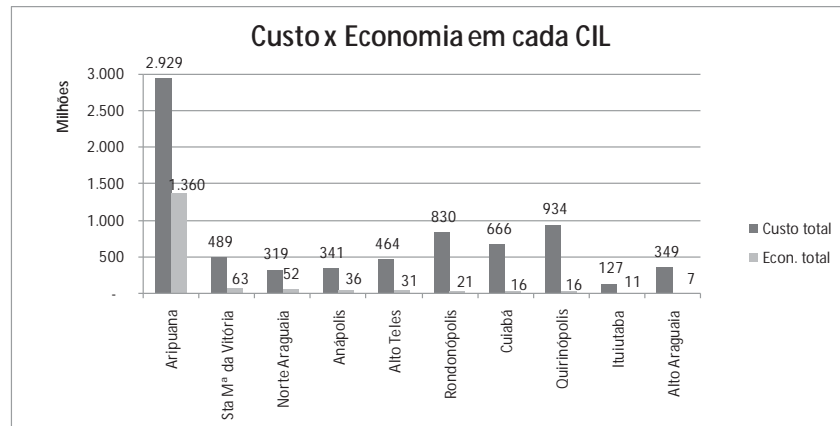


Figura 4: Relação entre o custo e a economia associados à utilização dos CILs

Finalmente, é importante ressaltar que o reduzido tempo de CPU gasto pelo CPLEX para resolver a instância teste, ou seja, 0,4 segundos, não é um indicativo da dificuldade prática de resolução do problema. Com o aumento do número de produtos, aumentam também, fortemente, a demanda por memória RAM e o tempo de resolução. Se memória adicional e um processador mais rápido não estiverem disponíveis, implementar um algoritmo de solução específico para o problema seria então uma opção a seguir.

6. Considerações finais

Este trabalho descreve uma aplicação do modelo de localização-alocação proposto por Guimarães (2015). Especificamente, um caso teste foi resolvido envolvendo quatro produtos importantes para o agronegócio brasileiro e a base de dados georreferenciada do PNLT. Os resultados obtidos sugerem a abertura de 10 CILs e identificam as microrregiões em que estes devem ser estabelecidos. Além disso, definem os produtos e os volumes de carga associados a cada CIL, minimizando assim o custo total de transporte. Ressalta-se, contudo, que as microrregiões indicadas para abertura de CILs são aquelas que minimizam os custos e capacidades atualmente disponíveis. Portanto, uma alteração nesses dados pode levar a resultados distintos.

Como as principais limitações deste trabalho, apontamos: o uso de dados secundários e estimados; o fato de terem sido considerados apenas quatro produtos da matriz de cargas brasileira; não terem sido incorporadas na base de dados georreferenciada as obras sugeridas por programas e planos governamentais recentes, como o PIL ferroviário; não serem considerados os custos de eventuais transbordos intermodais após o processamento nos CILs; e não serem considerados os custos de instalação de CILs.

Como sugestões de trabalhos futuros, destacamos uma investigação considerando: grupos adicionais de produtos do PNLT; restrição de recursos para investimento; custos diferenciados por tipo de produto; custos de transbordo pós CIL; novos investimentos em infraestrutura (previstos nos planos e programas recentes); e as opções de cabotagem e de dutos (para os produtos que as permitam, tais como combustíveis e derivados); imposição de uma capacidade máxima para a utilização de um determinado CIL; e a inclusão do parâmetro tempo, ou seja, a identificação do momento em que um CIL deverá ser aberto. Além disso, pode-se fazer necessária a atualização de dados e custos adicionais e, possivelmente, ajustes nas matrizes de O/D.

Finalmente, apesar do modelo atender as demandas par-a-par, ele ainda carece de restrições que garantam aos agentes envolvidos utilizar sempre, dentre os CILs abertos, aqueles que lhes sejam mais favoráveis (ou seja, que ofereçam a maior vantagem econômica para transportar seus produtos). Isto significaria escolher aquele CIL que lhes proporciona o menor custo de transporte e não aquele que leva ao menor custo de transporte global, como imposto pelo modelo. Assim sendo, o desenvolvimento e a inclusão dessas restrições no modelo devem ser objeto de trabalhos futuros.

Uma nota final é que, vencidos os desafios descritos acima, elementos de Programação Estocástica deveriam ser incorporados ao modelo, visto que trabalhamos aqui com projeções de demandas futuras.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Almur, S. A., Kara, B. Y., Karasan, O. E.** (2012) "Multimodal hub location and hub network design", *Omega*, v.40, pp. 927-939.
- Almur, S., Kara, B.Y.** (2008) "Network hub location problems: The state of the art", *European Journal of Operational Research*, v. 190, pp. 1-21.
- ANTAQ**(2013)*Plano Nacional de Integração Hidroviária – PNIH: Relatório de Metodologia. Desenvolvimento de Estudos e Análises das Hidrovias Brasileiras e suas Instalações Portuárias com Implantação de Base de Dados Georreferenciada e Sistema de Informações Geográficas.* Brasília/DF.
- Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I.** (2004) "Modelling a rail/road intermodal transportation system", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 40, n.3, pp. 255-270.
- 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.
- BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento** (2011), *Corredor Bioceânico Ferroviário – Estudos Técnicos Referentes ao Eixo de Capricórnio.* In: Pesquisas e Estudos Técnicos Destinados à Avaliação Técnica, Econômico-Financeira e Jurídico-Regulatória de Soluções Destinadas a Viabilizar o Sistema Logístico Ferroviário de Carga entre os Portos no Sul/Sudeste do Brasil e os Portos do Chile, Volume 10 – Tarifas. Brasília/DF.
- Campbell, J. F., O'Kelly, M. E.** (2012) "Twenty-Five Years of Hub Location Research", *Transportation Science*, v. 46, n.2, pp. 153-169.
- Chopra, S., Meindl, P.,** (2011) *Gestão da Cadeia de Suprimentos – estratégia, planejamento e operação.* 4a edição, São Paulo: Pearson-Prentice Hall.
- CNT e COPPEAD** (2002) "Transporte de Cargas no Brasil: Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País – Diagnóstico e Plano de Ação". In: *Relatório da Confederação Nacional do Transporte – CNT, Centro de Estudos em Logística do Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração – COPPEAD e Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro/RJ.*
- CNT – Confederação Nacional dos Transportes** (2014) *Plano CNT de Transporte e Logística - 2014.* Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Plano-CNT-de-Log%C3%ADstica.aspx>.
- Correa, V. H. C., Ramos, P.** (2010) "A precariedade do transporte rodoviário brasileiro para o escoamento da produção de soja do Centro-Oeste: situação e perspectivas", *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 48, n.2, pp. 447-442.
- Costa, M. B. B.** (2014) *Utilização De Modelo De Localização-Alocação Para Identificação De Zoneamento Logístico Integrado Ao Planejamento Estratégico De Transportes.* Tese Doutorado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- Crainic, T. G., Laporte, G.** (1997) "Planning models for freight transportation", *European Journal of Operational Research*, v. 97, pp. 409-438.

- Daskin, S. M., Snyder, L. V., Berger, R. T. (2003)** *Facility Location in Supply Chain Design*. In: Department of Industrial Engineering and Management Sciences Northwestern University, Evanston, Illinois, U.S.A. Working Paper No. 03-010.
- Diniz, C. C. (2006)** *Dinâmica espacial e ordenamento do território. Comissão econômica para a América Latina e o Caribe – CEPAL*. Acesso: 17/09/2014.
- Dubke, A.F. (2006)** *Modelo de Localização de Terminais Especializados: um Estudo de Caso em Corredores de Exportação da Soja*. Tese de Doutorado, Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica – PUC. Rio de Janeiro/RJ.
- Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Arabani, A. B. et al. (2013)** “Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 64, pp. 1096–1109.
- Fleury, P. F. (2011)** Infraestrutura – sonho ou realidade? In: *8º fórum de economia da Fundação Getúlio Vargas*, São Paulo.
- Fleury, P. F. (2003)** “Terceirização logística no Brasil”. In: FIGUEIREDO, K. F.; FLEURY, P. F.; WANKE, P. (Eds.) *Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos*. São Paulo: Editora Atlas.
- Groothedde, B., Ruijgrok, C., Tavasszy, L. (2005)** “Towards collaborative, intermodal hub networks: A case study in the fast moving consumer goods market”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v.41, n.6, pp.567–583.
- Guimarães, V. de A. (2015)** Modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística considerando as demandas par-a-par. Dissertação de mestrado em Engenharia de Transportes. PET/COPPE/UFRJ: Rio de Janeiro.
- Ishfaq, R., Sox, R. C. (2011)** “Hub location–allocation in intermodal logistic networks”, *European Journal of Operational Research*, v. 210, p.p. 213–230.
- Limbourg, S., Jourquin, B. (2009)** “Optimal rail–road container terminal locations on the European network”. *Transportation Research E*, v.45, n.4, pp.551–563.
- Lopes, S. S., Cardoso, M. P., Piccinini, M. S. (2008)** “O Transporte rodoviário de carga e o papel do BNDES”, *Revista do BNDES*, v.14, n.29, pp. 35-60.
- Meisel, F., Krischstein, T., Bierwirth, C. (2013)** “Integrated production and intermodal transportation planning in large scale production–distribution-networks”. *Transportation Research Part E*, v. 60, pp. 62–78.
- Melo, M. T, Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F. (2009)** “Facility location and supply chain management: a review”, *European Journal of Operational Research*, vol. 196, pp. 401-412.
- Ministério da Agricultura – MA (2015)** *Agronegócios*.
- Ministério dos Transportes – MT (2007)** *Plano Nacional de Logística e Transportes: Sumário executivo*. Brasília.
- Ministério dos Transportes – MT (2009)** *Relatório Executivo PNL T*. Brasília.
- Ministério dos Transportes – MT (2012)** *Projeto de reavaliação de estimativas e metas do PNL T: Relatório Final*. Brasília.
- Padula, R. (2008)** *Transportes - Fundamentos e propostas para o Brasil*. Brasília: Confea. Disponível em: <http://www.confea.org.br/media/Livro_Transportes.pdf>.
- Quadros, S. G. R., Nassi, C. D. (2015)** “An evaluation on the criteria to prioritize transportation infrastructure investments in Brazil”. *Transport Policy*, v.40, pp.8-16.
- Racunica, I., Wynter, L. (2005)** “Optimal location of intermodal freight hubs”. *Transportation Research Part B: Methodological*, v.39, n.5, pp. 453–477.
- Sirikijpanichkul, A., Ferreira, L. (2005)** “Multi-Objective Evaluation of Intermodal Freight Terminal Location Decisions”. In: *Proceedings of the 27th Conference of Australian Institute of Transport Research (CAITR)*, Queensland University of Technology.
- Slack, N., Chambers, S., Johnston, R. (2009)** *Administração da Produção*. 3ª ed. São Paulo: Editora Altas.
- USP – Universidade de São Paulo (2012)** *Sistema de Informações de Fretes – SIFRECA*. Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial – ESALQ-LOG, Piracicaba/SP.