

# OTIMIZAÇÃO LOGÍSTICA PARA O TRANSPORTE MULTIMODAL DE SAFRAS AGRÍCOLAS PELO CORREDOR CENTRO-NORTE: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO<sup>1</sup>

José Eduardo Holler Branco<sup>\*</sup>

José Vicente Caixeta Filho<sup>\*\*</sup>

Carlos Eduardo Osório Xavier<sup>\*\*\*</sup>

Augusto Hauber Gameiro<sup>\*\*\*\*</sup>

Walter Henrique Malachias Paes<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Betty Clara Barraza de La Cruz<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## RESUMO

Apresenta um modelo matemático de otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas pelo corredor Centro-Norte. Tal ferramenta foi desenvolvida no contexto de três amplos projetos de pesquisa financiados pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e executados por um grupo de universidades. O modelo, conhecido genericamente como Modelo de Fluxo de Custo Mínimo Multiproduto, considera a otimização de fluxos em rede, para os produtos açúcar, álcool, milho, soja, óleo de soja, farelo de soja e trigo. O modelo proposto para estimativa dos fluxos inter-regionais mostrou-se uma ferramenta factível para fins de avaliação do potencial de utilização da multimodalidade. Os resultados propiciaram a identificação das principais localidades que apresentam potencial de captação multimodal de cargas, atualmente, e em um cenário futuro projetado. A análise desses resultados gera importantes subsídios à seleção dos locais para instalação de mecanismos e equipamentos de transferência de cargas, além de auxiliar no dimensionamento dessas infraestruturas. Também é um resultado importante do ferramental desenvolvido a identificação das zonas de geração de cargas captável pelas ferrovias, hidrovias e dutovias, atualmente e no futuro, por meio de simulação para um cenário no ano 2015.

**Palavras-chave:** Transporte. Logística. Produtos Agrícolas. Pesquisa Operacional.

\* Pesquisador. Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial da USP. E-mail: jehollerbranco@gmail.com.

\*\* Professor Titular. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP. E-mail: jose.caixeta@usp.br.

\*\*\* Pesquisador. Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial, USP. E-mail: ceox@esalq.usp.br.

\*\*\*\* Professor Doutor. Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, USP. E-mail: gameiro@usp.br.

\*\*\*\*\* Pesquisador. Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial, USP. E-mail: walterm paes@yahoo.com.br.

\*\*\*\*\* Professora Adjunta. Fundação Universidade Federal do Tocantins. E-mail: bettyvan2001@yahoo.com.br.

## **LOGISTIC OPTIMIZATION FOR MULTIMODAL AGRICULTURAL PRODUCTS TRANSPORT BY CENTER-NORTH CORRIDOR: DEVELOPMENT AND APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL**

### **ABSTRACT**

This paper presents a mathematical model for interregional flows optimization through the multimodal Center-North Transportation Corridor in Brazil. The model, generically known as Multicommodity Minimum Cost Flow Problem, is a kind of network flows equilibrium model and was applied to evaluate the minimum transportation cost of sugar, alcohol, corn, soybean, soybean oil, soybean meal and wheat flows in the corridor. The model of interregional flows showed be an important method to measure the freight demand by the multimodal infrastructure in the region. Also, the model indicates the main locations that have potential to multimodal cargo and its captive are. The analyses of the results are important inputs for decisions related to best sites for transshipment terminals and they help to identify the captive area of railways, waterways and pipelines, considering the currently configuration of the transportation network and future scenarios as 2015 year.

**Key-words:** Transport. Logistics. Agricultural Products. Operational Research.

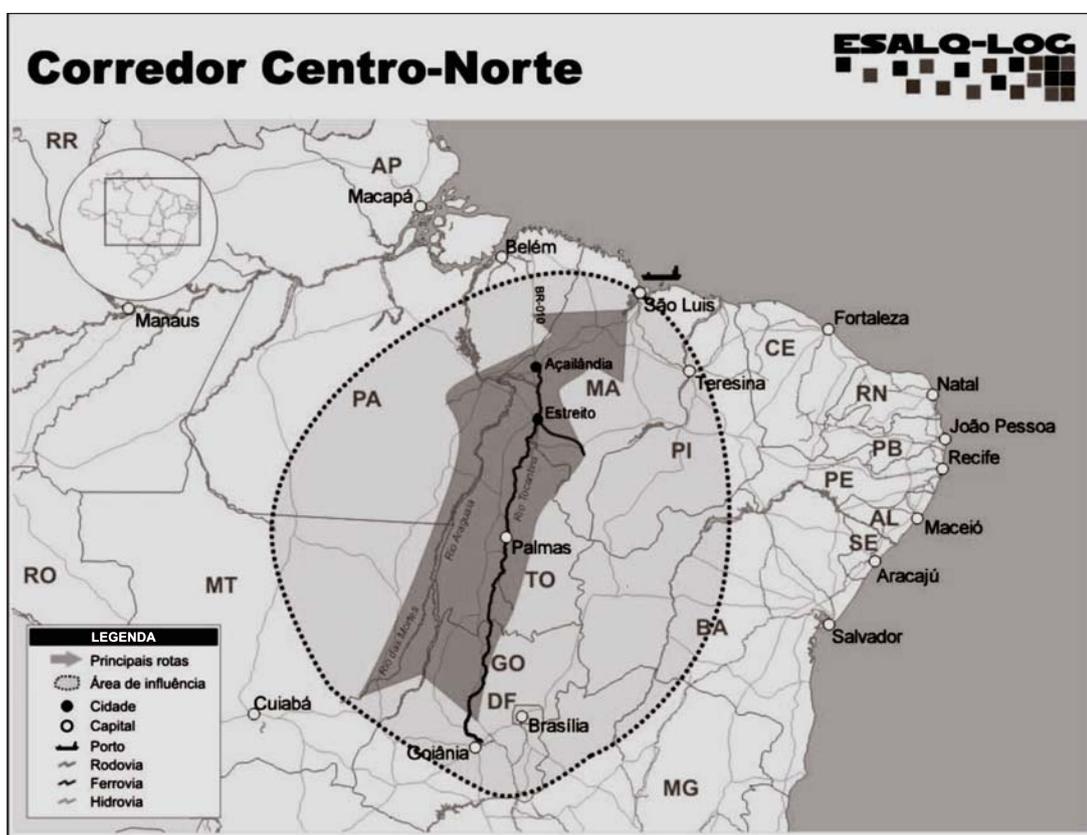
## 1 INTRODUÇÃO

A divisão geográfica brasileira não coincide com a divisão do País em seus corredores logísticos. Estes são constituídos por áreas que possuem em comum, fluxos predominantes de escoamento. O corredor Centro-Norte tem como áreas de influência os estados do Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Bahia e Pará. Alguns estão localizados em áreas limítrofes e, por isso, fazem parte de mais de um corredor.

Assim, para serem analisados os fluxos dos produtos de interesse, bem como as principais infraestruturas de transporte, em alguns casos

serão consideradas, apenas, algumas regiões, em detrimento de todo o estado, visto que estas áreas são representativas e se destacam como centros de escoamento dos principais produtos agrícolas os quais serão abordados neste trabalho. Dessa forma, como destaca o Mapa 1, o corredor Centro-Norte considera as regiões nordeste do estado do Mato Grosso, norte de Goiás, além do oeste da Bahia, leste do Pará e o estado do Tocantins. Também serão considerados especificamente alguns municípios da microrregião de Unaí, no estado de Minas Gerais; e o Porto de Itaqui, em São Luís (MA).

Mapa 1 - Área de influência do corredor Centro-Norte.



Fonte: ESALQ-LOG/GISMAPS (2009).

Para o presente estudo serão considerados alguns dos principais produtos do setor agrícola nacional: açúcar, álcool, milho, soja, óleo e farelo de soja e trigo.

Este artigo apresenta um modelo matemático de otimização logística para o

transporte multimodal de safras agrícolas pelo corredor Centro-Norte. Tal ferramenta foi desenvolvida no contexto de três amplos projetos de pesquisa financiados pela FINEP e executados por um grupo de universidades.

## 2 MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA À LOGÍSTICA

De forma geral, as técnicas de modelagem utilizadas para a simulação de fluxos de transporte inter-regionais partem da divisão espacial da área que será analisada em zonas de carga e a escolha dos centróides (localidades geográficas) os quais representarão as origens e destinos das cargas. Para cada um dos centróides, são atribuídos valores de oferta e demanda de cargas, que representam a quantidade de carga que deve sair ou chegar a cada zona. Após essa etapa, simula-se a movimentação dos fluxos de cargas entre os centróides com excedente de oferta e os centróides com déficit de consumo, que deverão ser alocados com base na configuração da rede multimodal de transporte que conecta as zonas de carga, levando em consideração o comportamento e os critérios de decisões de embarcadores e transportadores.

Um estudo realizado pela *Actions de Préparation, D'accompagnement et du Suivi* (APAS, 1996) sugere uma estrutura geral para a modelagem de fluxos de passageiros e cargas inter-regionais dividido em cinco etapas, conforme descrito a seguir: i) Fase 1: estimativa do número de viagens ou quantidade de cargas que chegam ou que partem de cada zona; ii) Fase 2: a partir de cada zona estima-se para quais zonas as viagens ou as cargas serão

alocadas. Esta etapa gera como resultado uma Matriz Origem-Destino de fluxos de transporte; iii) Fase 3: nesse momento, escolhe-se a modalidade de transporte ou os meios de transporte através dos quais os fluxos de passageiros ou cargas deveriam ser alocados entre os centróides, com base no comportamento atribuído aos agentes embarcadores e transportadores; iv) Fase 4: essa etapa consiste da conversão das quantidades de cargas em tráfego de veículos, sendo particularmente importante para estudos de transporte de cargas, já que as fases antecessoras, no caso destes estudos, trabalham com quantidades em toneladas e não consideram o fluxo de veículos; e v) Fase 5: nessa fase, as viagens (número de veículos, caminhões, trens, navios etc.) são alocadas ou distribuídas através das redes viárias, da maneira mais adequada. Em alguns modelos, são levados em consideração efeitos de congestionamento ao longo da rede viária. Os resultados desta etapa podem ser comparados com o tráfego de veículos observados na realidade, com o intuito de calibrar e validar o modelo matemático.

Ainda segundo APAS (1996), normalmente os modelos de transporte são aplicados considerando dados de uma situação

atual, referentes a um ano base; entretanto, muitas vezes são desejáveis previsões de fluxos de transporte para anos futuros. Com este propósito, podem ser especificados cenários futuros, com base em previsões a respeito de fatores econômicos, demográficos e espaciais que interfiram nos fluxos de transporte inter-regionais.

O método para estimativa da demanda de carga proposto para atender ao escopo desse projeto compreende as fases 1, 2 e 3 da estrutura apresentada, e não trata diretamente do tráfego de veículos ao longo da rede viária nem efeitos de congestionamento de vias. Ao longo deste artigo serão apresentados os pressupostos e métodos adotados na concepção do modelo matemático sugerido para alocação dos fluxos inter-regionais de cargas agrícolas e para dar suporte à avaliação da quantidade de carga captável pelas alternativas multimodais de transporte disponíveis e projetada para o corredor Centro-Norte.

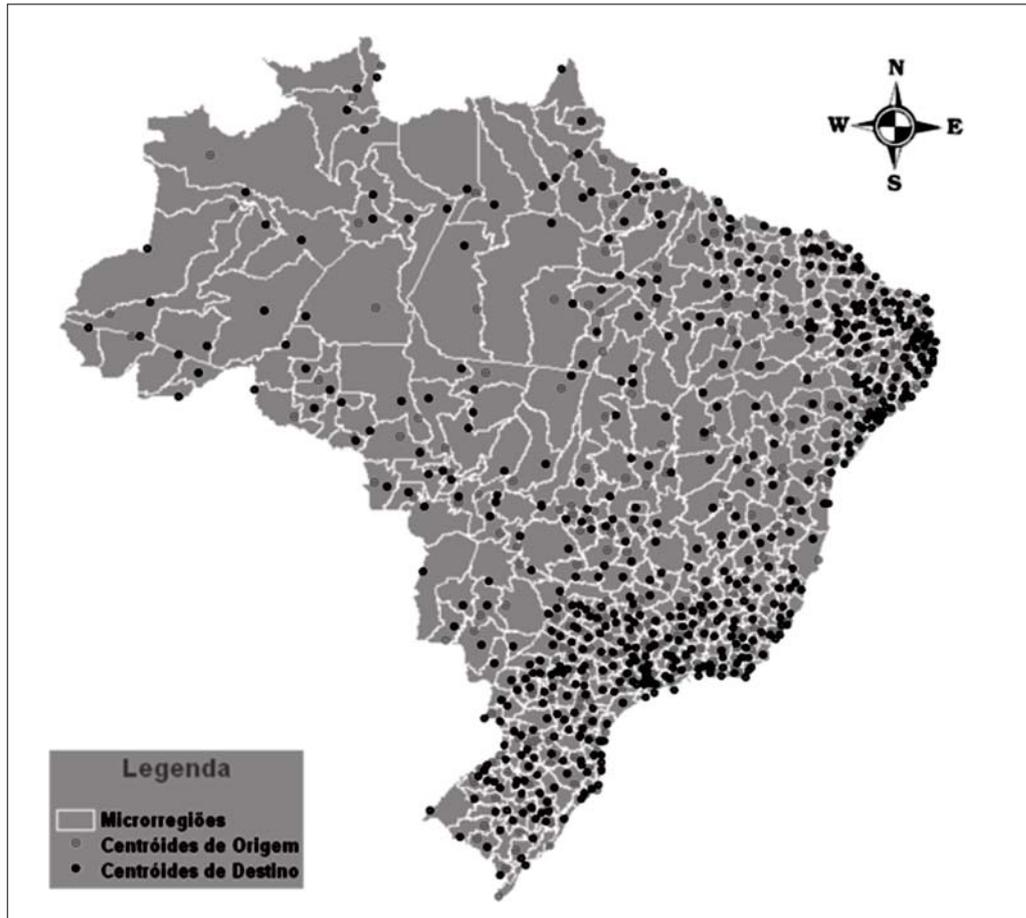
Apesar desse estudo ter como enfoque o corredor Centro-Norte, sugere-se que a demanda de carga captável pelas alternativas multimodais de transporte seja realizada com base em estimativas de fluxos inter-regionais de todo Brasil, já que as atividades econômicas na área de influência do corredor não são estanques e apresentam intercâmbio de mercadorias com outras regiões do País, sendo mais consistente,

portanto, estimar os fluxos de cargas observados entre todos os centróides de oferta de demanda de cargas do Brasil, ao invés de isolar os fluxos correlatos à área de influência.

Adotou-se como critério para a divisão espacial do território nacional as unidades geográficas denominadas Microrregiões, que são subdivisões dos estados brasileiros em áreas com similaridades econômicas e sociais, propostas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2009 a,b).

Para a finalidade de cálculo de distâncias e estimativa do custo de transporte entre as unidades geográficas, foram definidos os centróides (municípios) representantes das microrregiões, que são considerados sedes de cada unidade geográfica, utilizadas para fins de localização da origem ou destino dos fluxos de cargas. Pelo fato do escopo desse projeto envolver o transporte de cargas agrícolas, a escolha dos centróides de oferta de carga adotou como critério a representatividade de cada município em termos do Produto Interno Bruto (PIB) do setor agrícola dentro de cada microrregião. No caso da seleção dos centróides de atração de carga, o critério considerado foi o PIB do setor industrial, avaliado como um bom indicador do nível de consumo de matérias-primas agrícolas. Os centróides escolhidos para as microrregiões podem ser visualizados no Mapa 2.

Mapa 2 - Divisões do território nacional em Microrregiões e respectivos centróides.



Fonte: ESALQ-LOG (2009).

Pode ser constatado que à medida que a divisão espacial envolve menores unidades geográficas, maior é a precisão dos resultados do modelo, já que é possível a escolha de um recorte territorial mais detalhado e uma representação mais precisa da infraestrutura viária. Por exemplo, caso fossem considerados todos os municípios brasileiros como centróides de produção e de atração de carga, isto implicaria uma representação mais detalhada e mais real do fluxo de cargas inter-regional. No entanto, a adoção de um grande número de centróides pode aumentar por demais o número de pares origem-destino (explosão combinatória), demandando capacidades de memória não disponíveis nos computadores pessoais convencionais durante

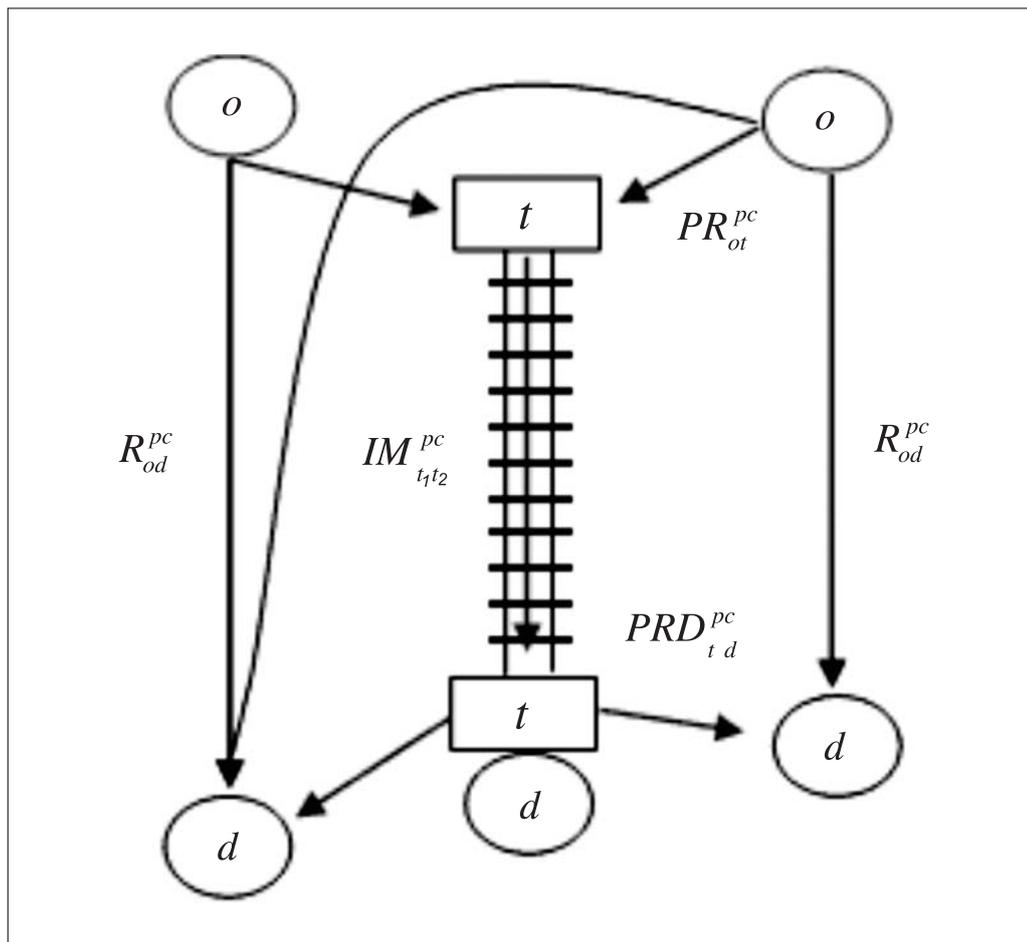
o processamento do modelo de otimização. Neste sentido, o método de zoneamento envolveu os cuidados necessários para se evitar limitações dos recursos computacionais disponíveis para a resolução do modelo.

A alocação dos fluxos de produtos entre as regiões geradoras de carga e as regiões de atração de carga, através da rede viária, ocorreu com o auxílio de um modelo linear de otimização, que teve como objetivo a minimização do custo total de transporte de cargas. A somatória dos fluxos indicados pela solução do modelo para movimentação através da rede multimodal de transporte do corredor foi a informação usada para avaliar a demanda de carga captável pelas alternativas multimodais de transporte.

Para a simulação dos fluxos de carga e da escolha das combinações de transporte e rotas entre os centróides de origem e centróides de destino de forma a atingir o menor custo global de transporte, desenvolveu-se um modelo com

base no Modelo de Fluxo de Custo Mínimo Multiproduto (*Multicommodity Minimum Cost Flow Problem*), a partir de Ahuja (1993). A lógica associada ao modelo matemático desenvolvido é ilustrada através da Figura 1.

Figura 1 - Esquema representativo do Modelo de Fluxo de Custo Mínimo Multiproduto.



Fonte: adaptado de Ahuja (1993).

O modelo se baseia em um método de otimização de fluxos em rede, onde os nós dessa rede podem representar uma região de oferta de carga, uma região de demanda de carga ou uma localidade que abriga um terminal de transbordo, e os arcos representam as alternativas de transporte disponíveis para a passagem de carga. Os tipos de nós da rede e os tipos de fluxos ao longo dos arcos foram assim definidos:

*o*: centróides de geração de carga;

*d*: centróides de atração de carga;

*t*: terminais de transferência de carga entre as modalidades de transporte. Para fins de descrição da estrutura matemática do modelo, são definidos três tipos de terminais de transferência:

$t_1$  - terminal de transbordo que corresponde à origem do fluxo de carga num dado trecho ferroviário, dutoviário ou hidroviário, denomina-se terminal de carregamento;

$t_2$  - terminal de transbordo que corresponde ao destino do fluxo de carga num dado trecho ferroviário, dutoviário ou hidroviário, denomina-se terminal de descarregamento;

$b$  - base de distribuição que representa os nós da rede que correspondem às bases de distribuição de combustível. No caso do transporte de álcool, os fluxos que saem das usinas devem passar por um terminal de transferência de carga que seja uma base de distribuição antes de chegar aos postos de varejo.

$R_{od}^{pc}$ : fluxo rodoviário do produto  $p$  originado a partir do centro gerador de carga  $o$  com destino ao centro de atração de carga  $d$ , vinculado ao canal de comercialização  $c$  (mercado de exportação, importação ou doméstico);

$PR_{ot}^{pc}$ : fluxo do produto  $p$ , na ponta rodoviária entre o centro gerador de carga  $o$  e o terminal de transferência de carga  $t$ , vinculado ao canal de comercialização  $c$ ;

$IM_{t_1 t_2}^{pc}$ : fluxo multimodal do produto  $p$  (através do modal ferroviário, hidroviário e/ou dutoviário) entre o terminal de transferência de carga de carregamento  $t_1$  e o terminal de transferência de carga de descarregamento  $t_2$ , vinculado ao canal de comercialização  $c$ .

$PRD_{td}^{pc}$ : fluxo do produto  $p$ , na ponta rodoviária entre o terminal de transferência de carga  $t$  com destino ao centro de atração de carga  $d$ , vinculado ao canal de comercialização  $c$ .

O objetivo do modelo é minimizar o custo total de transporte para o deslocamento das cargas ofertadas pelos centróides  $o$  e demandadas pelos centróides  $d$ . A somatória dos fluxos  $IM_{t_1 t_2}^{pc}$  corresponde ao volume de carga captável pelas alternativas de transportes multimodais.

Fundamentando-se na lógica do modelo de fluxos em rede apresentada, desenvolveu-se um modelo de otimização que pode ser algebricamente representado pela seguinte estrutura matemática:

Função objetivo: minimização do custo logístico total expresso algebricamente por:

$$\sum_p \sum_o \sum_d \sum_c R_{od}^{pc} \times F_{od}^p + \sum_p \sum_o \sum_{t_1} \sum_c PR_{ot}^{pc} \times F_{ot}^p + \sum_p \sum_{t_1} \sum_{t_2} \sum_c (IM_{t_1 t_2}^{pc} \times F_{t_1 t_2}^{pc} + TT_t) + \sum_p \sum_{t_2} \sum_d \sum_c (PRD_{td}^{pc} \times F_{td}^p + TT_t) \quad (1)$$

onde:

$F$  corresponde ao valor de frete para cada trecho da rota; e

$TT$  corresponde às tarifas cobradas nos terminais de transbordo.

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_d \sum_c R_{od}^{pc} + \sum_t \sum_c PR_{ot}^{pc} = OF_o^{pc} + IMP_o^p \left\{ \begin{matrix} \forall o \\ \forall p \end{matrix} \right. \quad (2)$$

ou seja, a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$  originados a partir do centro gerador

de carga  $o$ , considerando todos os canais de comercialização  $c$  (exportação, importação e doméstico) e direcionados aos centros de atração de carga; mais a somatória dos fluxos rodoviários de produto  $p$  originados a partir do centro gerador de carga  $o$  e deslocados até os terminais de transferência, deve ser igual à oferta do produto  $p$  pelo centro gerador de carga  $o$  (definida por  $OF$ ) mais a importação de cargas realizadas através daquela localidade (definida por  $IMP$ ).

Esta restrição garante que a soma de todos os fluxos de cargas que partem de um dado centróide corresponda à produção daquela zona de carga mais a quantidade a qual foi importada através daquele centróide, o que equivale à oferta global de cargas daquela localidade. É importante frisar que alguns centróides exercem, também, a função de terminais portuários, fazendo a ponte com o mercado internacional; sendo assim, deve ser adicionada a quantidade de carga importada através daquela localidade como parte da oferta da zona de carga, ou como parte da demanda de carga quando se tratar de um centróide exportador.

$$\sum_o \sum_c R_{od}^{pc} + \sum_t \sum_c PRD_{td}^{pc} = DEM_d^p + EXP_d^p \quad \left\{ \begin{array}{l} \forall d \\ \forall p \end{array} \right. \quad (3)$$

ou seja, a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$  originados a partir dos centros geradores de carga com destino ao centro de atração de carga  $d$ , mais a somatória dos fluxos do produto  $p$  originados a partir dos terminais de transferência de carga com destino ao centro de atração de carga  $d$ , em todos os canais de comercialização, deve ser igual à demanda do produto  $p$  pelo centro de atração de carga  $d$  (definida por  $DEM$ ) mais a exportação do produto  $p$  realizada através do centro de atração de carga  $d$  (definida por  $EXP$ ). Esta restrição garante que a soma de todos os fluxos de um dado produto que chegam a um determinado centróide de destino não seja maior do que a

demanda mais a exportação do produto correspondente àquele centróide.

$$\sum_{o \in O_{uf}} \sum_{d \in d_{portos}} R_{od}^{pc} + \sum_{o \in O_{uf}} \sum_t PR_{ot}^{pc} \leq EXP_{uf}^p \quad \left\{ \begin{array}{l} \forall p \\ \forall uf \\ c \equiv c_{exportação} \end{array} \right. \quad (4)$$

ou seja, a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$  originados a partir dos centróides de oferta de carga  $o$  que pertençam a uma determinada unidade estadual  $uf$ , associados ao canal de comercialização que representa os fluxos de exportação ( $c_{exportação}$ ) e direcionados aos centróides de atração de carga considerados portos ( $d_{portos}$ ); mais a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$  originados a partir dos centróides de oferta de carga  $o$ , que pertençam a uma determinada unidade estadual  $uf$ , também associados ao canal de comercialização que representa os fluxos de exportação e direcionados aos terminais de transferência de carga, deve ser menor ou igual à exportação do produto  $p$  apresentada pela unidade estadual  $uf$ . Esta restrição garante que soma de todos os fluxos direcionados para exportação e originados a partir dos centróides de uma dada unidade estadual seja menor do que quantidade total exportada por aquele Estado, definida por  $EXP$ .

$$\sum_o R_{od}^{pc} + \sum_t PRD_{td}^{pc} = EXP_d^p \quad \left\{ \begin{array}{l} \forall p \\ \forall d \in d_{portos} \\ c \equiv c_{exportação} \end{array} \right. \quad (5)$$

ou seja, a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$ , originados a partir dos centróides  $o$ , associados ao canal de comercialização correspondente ao mercado de exportação ( $c_{exportação}$ ) e direcionados para um dado centróide de atração de carga  $d$  considerado porto; mais a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$ , originados a partir dos terminais de transferência de carga, associados ao canal de comercialização correspondente ao mercado de exportação e direcionados para o mesmo centróide de atração

de carga  $d$ , deve ser maior ou igual à quantidade do produto  $p$  exportada através daquele porto, definida por  $EXP$ .

É importante frisar que, muitas vezes, é conveniente trabalhar com valores de oferta e de demanda de carga projetados para um período futuro. Nessa situação, existe a opção de se transformar a equação numa inequação do tipo maior ou igual, caso a exportação resultante da oferta e demanda projetadas seja maior do que a atual, ou do tipo menor ou igual, caso contrário. Essa alteração restringiria uma movimentação mínima ou máxima por porto, ou por Estado, se aplicada à restrição relacionada à exportação por  $uf$ .

$$\sum_{d \in d_{uf}} \sum_{o \in o_{pt}} R_{od}^{pc} + \sum_{d \in d_{uf}} \sum_t PRD_{dt}^{pc} = IMP_{uf}^p \begin{cases} \forall p \\ \forall uf \\ c \equiv c_{importação} \end{cases} \quad (6)$$

ou seja, a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$  direcionados aos centróides de demanda de carga  $d$  que pertençam a uma determinada unidade estadual  $uf$ , associados ao canal de comercialização que representa os fluxos de importação ( $c_{importação}$ ) que partem dos centróides de oferta de carga considerados portos ( $o_{portos}$ ); mais a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$  originados a partir dos terminais de transbordo de transferência, também associados ao canal de comercialização que representa os fluxos de importação e direcionados aos centróides de demanda que pertençam a uma determinada unidade estadual  $uf$ , deve ser igual à importação do  $p$  produto correspondente à unidade estadual  $uf$ . Esta restrição garante que soma de todos os fluxos de importação direcionados aos centróides pertencentes a uma dada unidade estadual corresponda à quantidade total importada por aquele Estado, definida por  $IMP$ .

$$\sum_d R_{od}^{pc} + \sum_{t_1} PR_{ot_1}^{pc} = IMP_o^p \begin{cases} \forall p \\ \forall o \in o_{portos} \\ c \equiv c_{importação} \end{cases} \quad (7)$$

ou seja, a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$ , originados a partir do centróide de origem  $o$  considerado porto, associados ao canal de comercialização correspondente ao mercado de importação ( $c_{importação}$ ) e direcionados para os centróides de atração de carga; mais a somatória dos fluxos rodoviários do produto  $p$ , originados a partir do mesmo centróide de origem  $o$ , associados ao canal de comercialização correspondente ao mercado de importação e direcionados para os terminais de transferência de carga, deve ser equivalente à quantidade do produto  $p$  importada através daquele porto, definida por  $IMP$ .

Da mesma forma que as restrições de exportação, caso os valores os dados de oferta e demanda sejam alterados para fins de simulação de cenários futuros, a igualdade pode ser convertida em inequação do tipo menor ou igual, caso a importação resultante das projeções de oferta e demanda seja maior do que a atual, ou convertida em inequação do tipo maior ou igual, caso contrário. Esse tipo de alteração pode restringir uma movimentação máxima ou mínima por porto, ou por Estado, caso seja realizada na equação de importação por  $uf$ .

$$\sum_o PR_{ot_1}^{pc} + \sum_{t_2} IM_{t_2t_1}^{pc} = \sum_{t_2} IM_{t_2t_1}^{pc} + \sum_d PRD_{t_2d}^{pc} \begin{cases} \forall p \\ \forall c \\ \forall t \end{cases} \quad (8)$$

ou seja, os fluxos rodoviários do produto  $p$ , associado ao canal de comercialização  $c$ , com origem nos centróides de oferta de carga e direcionados para um dado terminal de transferência do tipo transbordo de carregamento  $t_1$ ; mais a somatória dos fluxos multimodais do produto  $p$ , vinculados ao mesmo canal de comercialização  $c$ , que partiram de terminais de transferência do tipo transbordo de descarregamento  $t_2$  direcionados para o terminais de transferência  $t_1$  deve ser igual a somatória dos fluxos do produto  $p$ , ainda considerando o

mesmo canal de comercialização  $c$ , que partiram dos terminais de carregamento em direção a um dado terminal de descarregamento  $t_2$ ; mais os fluxos rodoviários do produto  $p$  originados a partir do terminal de descarregamento  $t_2$  e direcionados para os centróides de atração de carga.

Portanto, para fins de identificação dos fluxos multimodais – objeto principal deste estudo – a análise dos resultados do modelo focalizou os valores assumidos pela variável  $IM_{t_1 t_2}^{pc}$ : fluxo multimodal do produto  $p$  (através do modal ferroviário, hidroviário e/ou dutoviário) entre o terminal de transferência de carga de carregamento  $t_1$  e o terminal de transferência de carga de descarregamento  $t_2$ , vinculado ao canal de comercialização  $c$ .

Os fluxos indicados pelo modelo permitem a identificação dos centróides geradores de carga captável pelas alternativas multimodais e a quantidade de carga gerada por cada centróide. Além disso, os fluxos de carga indicados pelo modelo, também trazem a identificação dos principais pontos de transbordo para embarque nas alternativas multimodais.

O modelo matemático de otimização foi processado com o uso do *solver* de programação linear CPLEX, através do software *General Algebraic Modeling System* (GAMS).

A determinação da oferta ou demanda de carga em uma dada unidade geográfica (zona) baseou-se nos níveis de produção e consumo dos produtos agrícolas mais representativos em termos de quantidade transportada ao longo do corredor de transporte estudado.

Com base nesse critério e, também, considerando a aptidão dessas cargas para o transporte multimodal delas, foram selecionados

os produtos ou classe de produtos relevantes que seriam considerados no estudo de fluxos inter-regionais, sendo eles: soja, milho, trigo, açúcar, álcool, óleo de soja e farelo de soja. A oferta e demanda correspondentes a um determinado produto e a uma dada zona de carga podem ser determinados de forma endógena aos modelos de estimativa de fluxo inter-regionais (como acontece nos casos dos modelos de equilíbrio espacial), ou de maneira exógena (como ocorre no uso de modelos de otimização de fluxos em redes). Particularmente, o método proposto para esse estudo enquadra-se na segunda classe de modelos, sendo, portanto, os valores de oferta e demanda tratados como variáveis exógenas. Neste sentido, pressupõe-se que a quantidade produzida de um dado produto em um dado centróide corresponde à oferta da unidade geográfica (zona) associada àquele centróide, enquanto a quantidade de um dado produto consumida por um dado centróide equivale à demanda da unidade geográfica correspondente.

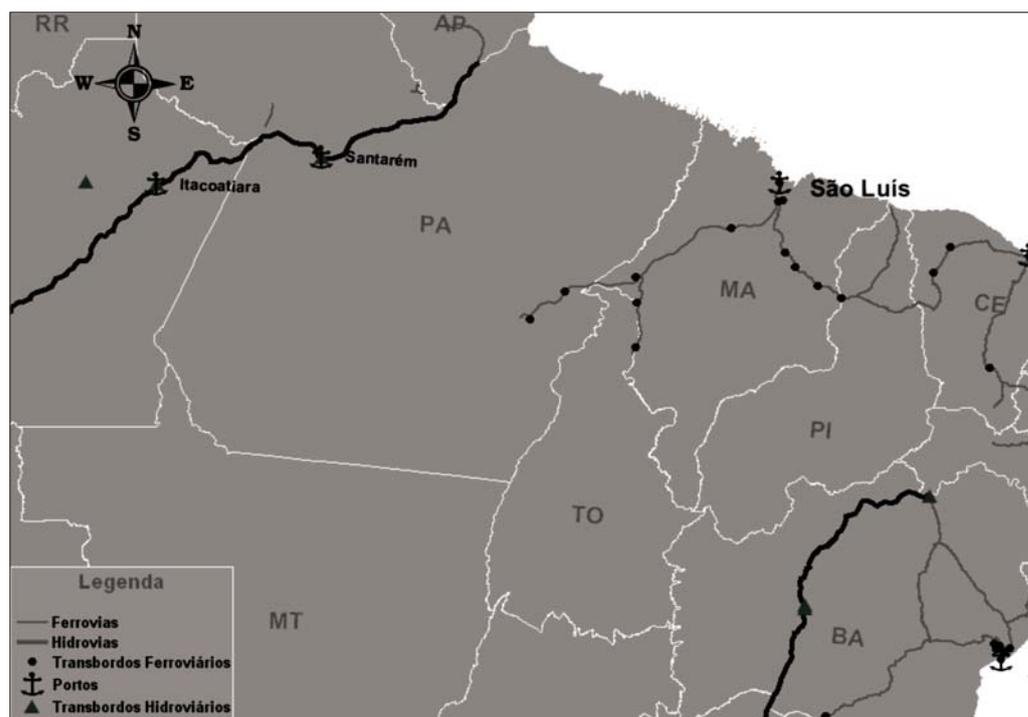
Cabe ressaltar que grande parte das informações de produção e consumo dos produtos relevantes para o estudo de demanda de carga multimodal não estava disponível em um nível de desagregação compatível com o zoneamento pretendido. Consequentemente, para desagregar os dados de maneira a atender a divisão espacial adotada, foi imprescindível o uso de *proxys*. As informações de oferta e demanda de carga, quando não disponíveis ao nível adequado de desagregação, foram fracionadas ou estimadas em nível municipal, sendo estas informações posteriormente agregadas para determinação da oferta e demanda de cargas nas microrregiões. A seguir, são apresentadas as fontes de dados utilizadas para a determinação da oferta e demanda de cada produto assim como os métodos empregados para desagregação dessas informações.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estimativa de demanda de carga captável pelas alternativas multimodais foi realizada considerando-se o ano-base de 2007 ("cenário atual"). Os resultados foram obtidos para dois cenários envolvendo configurações distintas da rede multimodal de transporte. Desta forma, pretendeu-se analisar o potencial de captação de cargas pelas alternativas multimodais atualmente em operação e os efeitos decorrentes dos projetos de expansão da malha ferroviária e hidroviária.

O primeiro cenário, "cenário atual", contempla apenas a malha ferroviária e hidroviária atualmente existente, sendo que os níveis de oferta e demanda foram determinados com base na produção, demanda, exportação e importação correspondentes ao ano-base de 2007. O Mapa 3 ilustra a rede ferroviária e hidroviária considerada na modelagem dos fluxos inter-regionais correspondentes ao "cenário atual", seus respectivos centróides e portos correspondentes aos corredores de transporte Centro-Norte.

Mapa 3 - Malha ferroviária, hidroviária e terminais de transbordo do corredor de transporte Centro-Norte, utilizados no "cenário atual".



Fonte: ESALQ-LOG (2009).

Os resultados, também, foram processados considerando projeções dos níveis de oferta e demanda de carga para o ano de 2015. O "cenário futuro" leva em consideração a produção futura estimada e os principais projetos de expansão das ferrovias, hidrovias e

alcooldutos. A malha ferroviária pertinente aos cenários futuros contempla: i) Ferrovia Norte-Sul ligando Senador Canedo (GO) até Açailândia (MA); ii) Nova Transnordestina operando entre Eliseu Martins (PI) e os portos de Pecém (CE) e Suape (PE); iii) Ferrovia Leste-Oeste conectando

a região de Luís Eduardo Magalhães (BA) ao Porto de Ilhéus (BA); iv) Ferroeste operando entre Cascavel (PR) e Maracaju (MS).

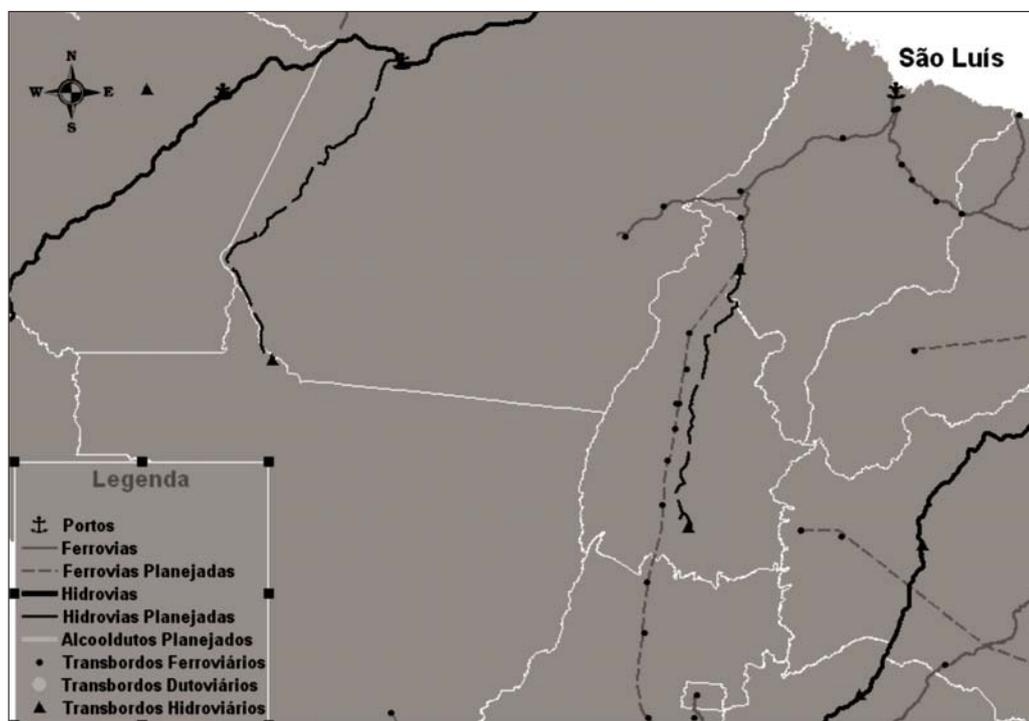
No caso dos projetos hidroviários, foram adicionados os seguintes trechos hidroviários: i) Hidrovia Teles-Pires, ligando Cachoeira Deitada (MT) ao Porto de Santarém; ii) Hidrovia do Tocantins, operando entre Peixes (TO) e Estreito (MA).

Para análise do comportamento dos fluxos de álcool, é importante considerar os projetos dutoviários destinados ao transporte de etanol que podem vir a ser implantados ao longo dos próximos anos. Uma série de agentes declarou intenções na construção de infraestrutura dutoviária para o transporte de etanol, sendo que a configuração da malha de alcooldutos sugerida para análise nesse cenário futuro específico envolve os seguintes projetos: i) Alcoolduto proposto pela União das Indústrias Canavieiras

(UNICA), que ligaria Anhembi (SP) a Paulínia (SP) e Santos (SP); ii) Alcoolduto proposto pela Empresa Brasileira de Biocombustíveis (BRENCO), que ligaria Alto Taquari (MT) a Paulínia (SP) e Santos (SP), passando por Costa Rica (MS), Paranaíba (MS) e São José do Rio Preto (SP); iii) Alcoolduto proposto pela Petrobras Transportes S.A. (TRANSPETRO), que ligaria Senador Canedo (GO) a Paulínia (SP) e o Porto de São Sebastião (SP), passando por Uberlândia (MG), Uberaba (MG) e Ribeirão Preto (SP).

Cabe frisar que existem outros projetos de expansão da malha ferroviária, hidroviária e dutoviária. Contudo, a equipe de pesquisadores envolvida neste estudo elegeu e elencou os projetos que se mostram mais prováveis de serem implantados até 2015. A configuração da malha multimodal considerada para o "cenário futuro" ao longo do Corredor Centro-Norte é ilustrada pelo Mapa 4.

Mapa 4 - Malha ferroviária, hidroviária, dutoviária e terminais de transbordo do corredor de transporte Centro-Norte, utilizados nos "cenários futuros".



Fonte: ESALQ-LOG (2009).

A análise dos resultados baseou-se na identificação e quantificação dos fluxos de cargas que revelaram potencial para movimentação na rede ferroviária e hidroviária, sob as condições e pressupostos considerados na construção do modelo. Foram, também, analisados os principais

centróides geradores de carga para as alternativas multimodais em estudo e os principais pontos de transbordos ao longo da rede viária, informações consideradas relevantes para o planejamento estratégico do sistema de transporte.

### 3.1 CENÁRIO ATUAL

Os resultados relativos aos produtos do complexo soja no "cenário atual", que envolve a soja em grãos, óleo de soja e farelo de soja, apontaram uma captação potencial de carga pelas hidrovias por volta de 4.000 mil t/ano, sendo que 70% desse volume corresponde à movimentação dessa classe de produtos através da Hidrovia do Rio Madeira. Aproximadamente 700 mil t/ano representam a captação potencial apresentada pela Hidrovia Tietê-Paraná, e os fluxos desse tipo de carga com aptidão para transporte através da Hidrovia São Francisco somaram cerca de 390 mil t/ano. Em relação ao potencial de embarque pela alternativa ferroviária, o modelo apontou uma movimentação aproximada de 36.100 mil t/ano de produtos do complexo soja, sendo que as ferrovias que se revelaram mais competitivas para esse tipo de carga foram: Ferronorte (ALL-Malha Norte), América Latina Logística (ALL), Ferroeste (ALL-Malha Oeste) e Ferrovia Centro-Atlântica (FCA).

Em relação aos fluxos dos produtos do complexo soja através do corredor Centro-Norte, as únicas alternativas multimodais existentes atualmente em sua área de influência envolvem o trecho em operação da Ferrovia Norte-Sul, entre Estreito (TO) e Açailândia (MA), chegando até o Porto de Itaquí (São Luís, MA) através da Estrada de Ferro Carajás. Os resultados revelaram um potencial de captação de carga por volta de 1.200 mil t/ano através da Estrada de Ferro Norte-Sul (EFNS), embarcando em Estreito (TO). É

importante frisar que a maior parte dos fluxos direcionados ao terminal de transbordo em Estreito (TO) foi originada na região de Balsas (MA). Segundo a Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT, 2008), esse terminal embarcou 1,3 milhão de toneladas de produtos do complexo soja em 2007, o que indica que ele vem operando volumes próximos ao potencial de carga indicado pelo modelo.

Em todo Brasil, os fluxos inter-regionais de milho apontados pelo modelo apresentaram um potencial de aproximadamente 11.000 mil t/ano através das alternativas de transporte ferroviário e 850 mil t/ano com potencial de movimentação através de hidrovias. Em 2007, as ferrovias brasileiras movimentaram 6.700 mil toneladas (ANTT, 2008); contudo, cabe ressaltar que ocorreu um grande aumento da movimentação ferroviária desse produto em relação a 2006, provavelmente devido ao aquecimento das exportações brasileiras de milho, verificada em 2007. Os terminais de transbordo apontados pelos resultados apresentaram uma distribuição espacial semelhante aos terminais dos produtos do complexo soja, sendo que esse comportamento pode ser justificado em parte pelo fato de as regiões produtoras de milho serem próximas as regiões produtoras de soja.

Quanto aos fluxos de trigo, o Sul do País abriga a maior parte das localidades com potencial de embarque ferroviário dessa carga, segundo os resultados do modelo. Como essa região não faz

parte da área de influência dos corredores de transporte considerados nesse estudo, os resultados sobre os fluxos multimodais de trigo não serão explorados em profundidade. No que tange à movimentação de milho e trigo ao longo do corredor Centro-Norte, elas mostraram-se menos expressivas quando comparadas com os fluxos multimodais dos produtos do complexo soja.

Os fluxos de açúcar apresentados pelos resultados demonstraram uma concentração do potencial de captação de carga com aptidão ao transporte multimodal no corredor Centro-Oeste de transporte, o que pode ser facilmente justificado em função da localização da maior parte das usinas de açúcar e álcool estarem situadas no estado de São Paulo e regiões vizinhas. No caso do corredor Centro-Norte, não foram observados fluxos multimodais ao longo desse corredor, nas condições do "cenário atual".

### 3.2 CENÁRIO FUTURO

Para a simulação dos fluxos no "cenário futuro", foram realizadas projeções para 2015 dos níveis de oferta e demanda em cada zona de carga. O superávit de oferta de cada produto no Brasil foi considerado como volume de exportação e o déficit como quantidade importada. Como as regiões de fronteiras agrícolas (BA, TO, MA, PI, MT, GO) vêm crescendo a um ritmo mais acelerado, considerou-se que dois terços do aumento das exportações em relação aos valores observados para o "cenário atual" seriam adicionados às quantidades exportadas pelas regiões de fronteira agrícola, de forma proporcional aos valores de exportação estadual adotados para o "cenário atual". O restante seria acrescentado à exportação estadual das áreas mais antigas de produção. No caso da quantidade exportada ou importada através de cada terminal portuário, o modelo foi restringido a uma movimentação mínima em cada porto, com base nos níveis observados em 2007,

Os fluxos de etanol, em função da distribuição regional da oferta bastante similar, apresentaram um padrão semelhante aos fluxos de açúcar. Quanto à captação multimodal de etanol no corredor Centro-Norte, o modelo não indicou nenhuma localidade potencial.

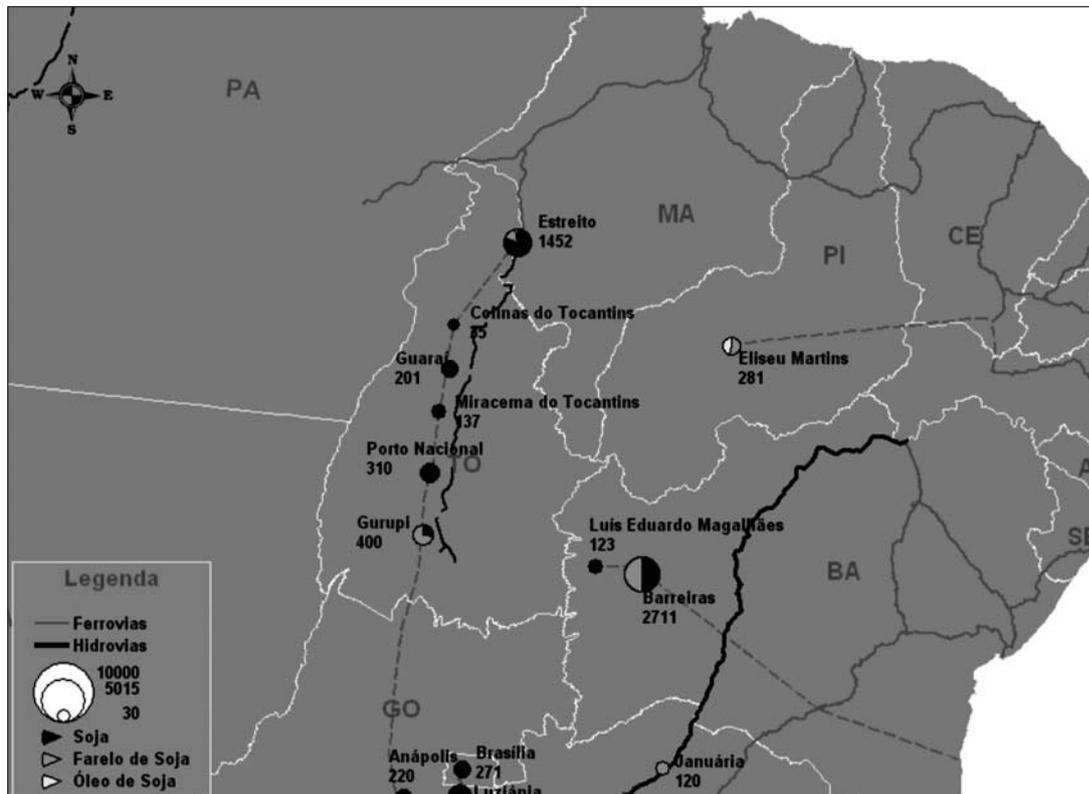
Note que a movimentação total sugerida pelo modelo é maior do que movimentação real. Nesse caso, a movimentação total sugerida é bastante próxima do volume de carga observado através da EFNS, indicacando que nesse corredor o potencial de carga de soja vem sendo captado em grande parte pela ferrovia. Esse comportamento pode ser justificado pelas precárias condições das rodovias a partir das regiões produtoras até o Porto de Itaquí, o que aumenta a disponibilidade para embarque na ferrovia.

sendo que o acréscimo de exportação ou importação no "cenário futuro" alocado livremente entre as opções portuárias consideradas nesse projeto.

Cabe reforçar que o "cenário futuro" considerou os projetos de ampliação da malha ferroviária, hidroviária e a implantação dos alcooldutos.

Quanto às novas localidades de captação multimodal de cargas decorrentes da expansão da EFNS, em direção a Senador Canedo (GO), destacaram-se as regiões de Gurupi (TO), Porto Nacional (TO) e Guaraí (TO) como localidades para implantação de operações de transbordo dos produtos do complexo soja. Os resultados do modelo apontaram um total de 2.500 mil t/ano dessas cargas com potencial de utilização da ferrovia em 2015 (Mapa 5).

Mapa 5 - Terminais de transbordo indicados pelos resultados do modelo matemático com potencial de captação dos produtos do complexo soja - maior do que 30 mil t/ano - ao longo do corredor Centro-Norte e respectivas quantidades captáveis (1000 t/ano).



Fonte: ESALQ-LOG (2009).

Ao longo do corredor Centro-Norte merece destaque a captação de açúcar pela EFNS, a partir de Gurupi (TO). Também foram observados fluxos com potencial de movimentação através da Hidrovia Tocantins-

Araguaia, embarcando na localidade de Peixe (TO). Contudo, ambas as localidades apresentaram potencial de captação multimodal pouco expressivo, em termos de volumes.

#### 4 CONCLUSÕES

O modelo proposto para estimativa dos fluxos inter-regionais mostrou-se uma ferramenta factível para fins de avaliação do potencial de utilização da multimodalidade. A análise dos resultados realça como pode ser importante a utilização desta ferramenta para uso em atividades relacionadas ao planejamento estratégico de um sistema de

transportes. A partir dos resultados obtidos é possível extrair informações importantes para estudos de viabilidade econômica de projetos de implantação de vias de transporte, dimensionamento de vias, análise do impacto da concorrência entre os modais de transporte e avaliação de outras questões que podem auxiliar a condução de políticas de

planejamento e regulação dos sistemas de transporte de cargas.

Os resultados apresentados pelo modelo de transporte considerado, neste estudo, propiciaram a identificação das principais localidades que mostraram potencial de captação multimodal de cargas. A análise dos mesmos gera importantes subsídios para a seleção dos locais com potencial para instalação de mecanismos e equipamentos de transferência de cargas, além de auxiliar no dimensionamento dessas infraestruturas.

Também é um resultado importante do ferramental desenvolvido a identificação das zonas de cargas que apresentam potencial captável pelas ferrovias, hidrovias e dutovias, ou seja, possibilita a identificação das regiões as quais revelam potencial para uso da multimodalidade.

Os resultados, também, apontaram as principais cargas agrícolas que revelam aptidão para movimentação através de alternativas multimodais, sendo esta informação relevante para o planejamento estratégico dos fluxos de transporte.

Outro subsídio para a decisão dos agentes envolvidos no planejamento estratégico da infraestrutura de transporte refere-se à avaliação dos impactos decorrentes dos projetos de expansão das malhas ferroviária, hidroviária ou dutoviária na captação de carga pelas alternativas multimodais. Este tipo de análise é importante para mensuração dos benefícios ou receitas gerados pelos projetos infraestruturais em curso.

Cabe ressaltar que os resultados e informações fornecidas pelo método desenvolvido não são suficientes para inferências

a respeito da viabilidade econômica das alternativas multimodais. As informações decorrentes da aplicação do modelo refletem de forma unilateral o comportamento dos agentes embarcadores, não sendo consideradas pelo modelo as decisões dos transportadores, que estariam relacionadas à viabilidade econômica de se promover a alternativa de transporte desejada pelos embarcadores.

Os parâmetros utilizados no modelo referem-se basicamente aos níveis de produção, consumo, exportação e importação relativos às unidades geográficas definidas no zoneamento, além do custo de transporte para movimentação das cargas através da rede de transporte considerada. A priori, estas são informações que podem ser levantadas com relativa facilidade. Cabe ressaltar que o uso de modelos mais complexos de estimativa de fluxos inter-regionais e de escolha modal (por exemplo, os modelos de Equilíbrio Espacial e os modelos de Escolha Discreta, como o modelo Logit Multinomial) exigem parâmetros adicionais, necessários para a calibração das funções de oferta e de demanda ou para calibração da função utilidade correspondente aos agentes embarcadores. Estas informações não se encontram facilmente disponíveis e podem demandar extensas pesquisas de campo. A dificuldade para calibração destes tipos de modelos é, ainda, maior no caso de estudos de demanda de carga que recorrem à análise dos fluxos de vários produtos.

No Brasil, ainda, não existem pesquisas sistemáticas dos níveis de oferta e demanda num nível de desagregação adequado para este tipo de modelagem, sendo que o desenvolvimento e disponibilização destes tipos de informação são de fundamental importância para os estudos de fluxos inter-regionais e para o planejamento e análise dos sistemas de transporte.

Cabe destacar que um dos setores que receberá grande parcela dos benefícios advindos com o desenvolvimento deste estudo será o meio científico e acadêmico, uma vez que este avançou

e consolidou um método com ampla aplicabilidade para a estimativa dos fluxos de cargas inter-regionais.

#### NOTA:

1 Este artigo resume parte dos resultados obtidos pelo projeto intitulado "Modelo Matemático de Otimização Logística para o Transporte Multimodal de Safras Agrícolas pelo Corredor Centro-Norte", desenvolvido por meio do Convênio 01.07.0773.00, estabelecido entre a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e a Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), executado pela Universidade de São Paulo (USP), por intermédio da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), através do Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG), tendo ainda como co-executor a Fundação Universidade Federal do Tocantins (FUFT). Os autores deste artigo agradecem a colaboração dos seguintes pesquisadores, envolvidos no desenvolvimento do projeto citado: Ana Paula Faretto, André Luís Arthuso Cuevas, Bruno Fernando de Oliveira, Carolina de Freitas Oliveira, Ciro Villela Oliva, Claudia Maciel de Lemos, Claudirene Romero de Oliveira, Daniel

Gerard Eijnsink, Daniel Godoy Penteadó Bragado, Daniela Cristina Passoni, Diogo Galvão Levez, Edson Roberto da Silva Michelin, Erica Gomes da Silva, Fernando Vinícius da Rocha, Flávia Zapparoli Beretta, Gabriela Fernandes Begiato, Heiko Rossmann, Isabela Vescove Primiano, Joseane Thereza Bigaran, Leandro Bernardino de Carvalho, Leandro Henrique Guglielmin Tizato, Leticia Corassa Neves, Luis Claudio Oliveira do Nascimento, Maria Andrade Pinheiro, Maria Clara Silva Serafim, Mariana Soto Silva, Maristela Minatel, Michael Camacho Roulet, Nermano Franco Ferreira, Priscila Biancarelli Nunes, Rafael Vassolér Torres, Renan Buselli Menezes, Rhuana Reijers, Ricardo de Campos Bull, Rodrigo Amâncio Briozo, Rodrigo Scapin Rosa, Rodrigo Viviani, Tatiana Beatriz de Oliveira Goudromilhos, Thiago Marques Baptista, Vanessa Duarte Rubia, Adriano Tenorio Pereira, Bruno Cesar Fleuri Siqueira, Bartira Maria Cechinel, Sarah Afonso Rodovalho e Vítor Pires Vencovsky.

## REFERÊNCIAS

ACTIONS DE PRÉPARATION, D'ACCOMPAGNEMENT ET DU SUIVI (APAS). **Transport strategic modeling**. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. 171 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE (ANTT). **Relatório anual de acompanhamento das concessões ferroviárias**: ano-base 2007. 2008. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/relatorios/ferroviaRio/concessionarias2007/index.asp>>. Acesso em: 12 jul. 2009.

AHUJA, R. K. **Network flows**: theory, algorithms, and applications. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993. 846 p.

ESALQ-LOG. Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial. **Otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas pelo corredor Centro-Norte**: Relatório de Pesquisa. Piracicaba, 2009. 156 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da pecuária municipal 2007**. 2009a. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

\_\_\_\_\_. **Produção agrícola municipal 2007**. 2009b. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2009.