



SPOLM 2009

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto de 2009.

086/2009 - UM MODELO DE LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS INTERMODAIS PARA EXPORTAÇÃO DE SOJA NO BRASIL

Mônica do Amaral ¹

Marina Soares Almeida ²

Reinaldo Morabito Neto ³

Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, CEP: 13.565-905

¹ monica@dep.ufscar.br, ² marinasoares@dep.ufscar.br, ³ morabito@ufscar.br

Resumo

A consideração de rotas intermodais de transporte pode ser vantajosa em diversas situações, como nos casos de escoamento de produtos agrícolas para exportação. Propõe-se, neste trabalho, um modelo de fluxos para localização de terminais intermodais, com o objetivo de auxiliar decisões de investimento em infraestrutura e de roteirização na rede. Esse modelo pode ser visto como uma extensão do modelo apresentado em Arnold *et al.* (2004), pela consideração de múltiplos níveis, em que cada nível corresponde ao fluxo entre dois terminais intermodais e pela forte relação com os problemas clássicos de p -medianas, sabidamente NP-difíceis. Testes preliminares realizados com dados secundários de um estudo sobre rotas para exportação de soja, publicado pelo GEIPOT (Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes), foram utilizados para verificar a coerência do modelo e ilustrar seu potencial de análise a partir dos resultados obtidos.

Palavras-Chaves: Localização de instalações; Fluxos em rede; Transporte intermodal; Logística; Exportação de soja.

Abstract

The consideration of intermodal transport routes may be advantageous in various situations, as in cases of agricultural products' flow for export. In this paper we propose a flow model for location of intermodal terminals, to support decisions on investment in infrastructure and network routing. This model can be seen as an extension of the model proposed in Arnold *et al.* (2004) because of the consideration of multiple levels, where each level corresponds to the flow between two intermodal terminals, and because of the strong link with the classical p -median problem, known as an NP-hard problem. Preliminary tests were performed using secondary data from a study about routes for soybean exports, published of GEIPOT (Group Executive of Policy Integration of Transport) to verify the consistency of the model and illustrate its potential to support decisions by analyzing the results.

Keywords: Facility location; Network flows; Intermodal transport; Logistics; Soybean exports.

1. INTRODUÇÃO

Transporte intermodal pode ser definido como o movimento de cargas entre uma origem e um destino utilizando-se de, pelo menos, dois modais de transporte diferentes (CHANG, 2008). Para Macharis & Bontekoning (2004), deve-se acrescentar a essa definição que as distâncias percorridas por rodovias devam ser as menores possíveis e que, para cargas containerizadas, também não ocorram trocas de contêiner ao longo da rota.

Chang (2008) afirma que a intermodalidade é reconhecida mundialmente como um meio bastante promissor para a redução dos custos logísticos, sendo vantajosa especialmente quando os pontos de produção e consumo se encontram geograficamente muito dispersos, como nos casos dos fluxos de produtos para exportação (GOETZ & RODRIGUE, 1999).

Outra motivação para a realização de estudos práticos é a crescente participação de órgãos governamentais como parceiros dessas pesquisas, fornecendo grandes quantidades de dados, muitos de difícil acesso sem esse apoio. Nesse aspecto, merecem destaque a Conferência Européia dos Ministros dos Transportes e a Associação Americana de Ferrovias. No Brasil, podem-se citar o projeto realizado pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT, 2000) e o estudo dos corredores de escoamento de produtos agroindustriais, atualmente financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia), no qual o presente trabalho está inserido.

Macharis & Bontekoning (2004) formalizaram algumas classes de problemas quantitativos, definidos de acordo com o ponto de vista do tomador de decisões: (i) as operações com caminhões, voltadas às atividades de coleta e entrega de carga, entre os terminais intermodais e os produtores ou clientes finais; (ii) as operações intermodais, cujo foco é otimizar os fluxos internos aos terminais intermodais; (iii) as operações de infraestrutura de rede, que têm por objetivo planejar mudanças físicas e prever seus impactos nos fluxos do sistema; (iv) as operações de roteirização, que buscam a minimização dos custos de transporte, considerando somente a estrutura física já existente.

O foco deste trabalho está em problemas concentrados no terceiro grupo dessa classificação. O objetivo é de apoiar decisões de investimento em infraestrutura, por meio da aplicação de um modelo de fluxos para localização de terminais intermodais aos principais corredores usados para a exportação da soja brasileira (GEIPOT, 2000), organizando os fluxos da forma mais econômica possível.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: na seção 2, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica restrita ao desenvolvimento de modelos e a estudos práticos encontrados no Brasil. A seguir, na seção 3, o modelo proposto para localização de terminais intermodais é formalizado. Na seção 4, são apresentados resultados computacionais ainda preliminares e em caráter ilustrativo, considerando configurações físicas e demandas descritas pelo Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, GEIPOT (2000), além alguns dados de capacidades descritos por ANTAQ (2009) e ANTT (2007). Encerra-se o trabalho, na seção 5, com algumas considerações a respeito da aplicabilidade do modelo e algumas perspectivas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Problemas que envolvem decisões de infraestrutura da rede intermodal concentram grande número de trabalhos (MACHARIS & BONTEKONING, 2004), mas são pouco aplicados na prática (ARNOLD *et al.*, 2001). Do ponto de vista de modelagem, estão relacionados a modelos clássicos de otimização, como localização de instalações e fluxos em rede. Jarżemskienė (2007) explica que esses problemas são fáceis de formular, mas difíceis de resolver, devido ao aumento da complexidade computacional do modelo, refletida pela explosão do número de variáveis binárias e de restrições que ocorrem com crescimento da rede considerada.

Dentre os artigos revisados, merecem destaque os desenvolvidos por Arnold *et al.* (2001, 2004). Primeiramente, nesses trabalhos foram apresentadas seis formulações para o

problema de localização de terminais, minimizando os custos de transporte e instalação. Posteriormente, uma formulação de menor complexidade computacional foi apresentada, juntamente com uma heurística, possibilitando o estudo de cenários reais na Península Ibérica.

Mais recentemente, têm-se também, por exemplo, os trabalhos de Racunica & Winter (2005), que propuseram um modelo para localização de terminais utilizando rede *hub-and-spoke* com custos côncavos não lineares. Limbourg e Jourquim (2009), por sua vez, propuseram um modelo de p -medianas para o mesmo fim.

No Brasil, a intermodalidade do transporte foi tratada em diversos trabalhos. Por exemplo, Ojima & Yamakami (2006) e Bulhões & Caixeta Filho (2007) utilizaram modelos de equilíbrio espacial para analisar os fluxos da soja em diferentes contextos. Ojima (2007) utilizou um modelo de transporte para analisar rotas alternativas de exportação da soja do Mato Grosso. Em relação ao uso de modelos de localização, foram encontrados trabalhos que exploram o transporte intermodal e a localização de armazéns, como Oliveira (2005), Ferrari (2006) e Xavier (2008), que consideraram a exportação de açúcar em São Paulo, de soja pelo Mato Grosso e de álcool combustível no Brasil, respectivamente.

Embora algumas contribuições importantes já tenham sido dadas, ainda é possível apontar diversas oportunidades de pesquisas envolvendo a questão da intermodalidade de transporte. Dentre elas, destaca-se a possibilidade desenvolver e aplicar um modelo de fluxos e localização multinível de terminais intermodais em redes para escoamento de produtos agroindustriais, como a soja, largamente exportada pelo Brasil.

3. LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS INTERMODAIS

O problema de localização de terminais intermodais consiste em, dadas as redes formadas pelas malhas viárias de cada modal, identificar os melhores pontos para instalação de pontos de transbordo, possibilitando transferência de carga entre eles e a redução dos custos logísticos. Isso ocorre especialmente quando se utilizam modais mais baratos, como o ferroviário e o hidroviário, para a transposição de longas distâncias e o modal rodoviário apenas em pequenos trechos. A rigor, todos os pontos da rede podem ser considerados como locais candidatos, mas pode ser útil considerar apenas locais favorecidos pela sua posição relativa aos pontos de produção e consumo, evitando também a proximidade com terminais considerados antagonísticos em função da concorrência por atração de carga (BALLIS & GOLIAS, 2004).

A determinação do número ótimo de terminais intermodais está condicionada ao *trade-off* entre os investimentos a serem realizados na rede e o seu potencial para redução dos custos de transporte e transbordo. Pode-se modelar essa situação considerando-se os custos fixos para instalação de cada terminal candidato na função objetivo ou, ainda, pelo estudo de cenários utilizando modelos do tipo p -medianas, em que o número de terminais instalados é fixado em p , selecionando-se a opção de menor custo de transporte e transbordo, após a análise do sistema para diferentes valores de p .

3.1. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Conforme mencionado, o modelo proposto consiste em uma extensão do trabalho de Arnold *et al.* (2004), que considera fluxos homogêneos para atender à demanda de pares origem-destino predefinidos, utilizando uma rede rodo-ferroviária orientada e não capacitada. O objetivo é minimizar os custos de transporte e de transbordo, de acordo com as possibilidades de instalação de um número p predefinido de terminais intermodais.

Algumas dessas premissas não capturam características importantes de certas particularidades brasileiras na exportação de soja. Assim, a formulação original foi modificada a fim de representar um modelo de oferta e demanda, de caráter mais geral, permitindo que qualquer ponto de oferta atenda à demanda de qualquer ponto de demanda. Além disso, diferentemente da formulação original, os fluxos foram expressos em função das quantidades transportadas, permitindo o fracionamento das cargas por mais de uma rota ao

longo da rede. Essa modificação se faz necessária para permitir a consideração de limitações de capacidades na rede, pois caso a rede seja considerada não capacitada, os fluxos simplesmente percorrem os caminhos de custo mínimo.

O sistema de transporte é representado por múltiplas redes, uma para cada modal considerado, como mostrado na figura 1. Cada uma das redes de transporte pode ser representada por um grafo direcionado, $G_m = (V_m, A_m)$, $m = \{1 = \text{modal rodoviário}, 2 = \text{modal ferroviário}, 3 = \text{modal hidroviário}\}$, em que V_m representa o conjunto de vértices e A_m o conjunto de arcos de cada modal (setas cheias, horizontais).

Um terminal intermodal é representado como um arco (seta tracejada, vertical) que conecta duas redes distintas, permitindo o transbordo da carga de um modal para outro. São permitidas combinações rodo-ferroviária (C), ferro-rodoviária (J), rodo-hidroviária (F), hidro-rodoviária (B e G), ferro-hidroviária (M) e hidro-ferroviária (G). Nos casos em que se tem um terminal que liga mais de dois modais, deve haver um arco representando cada combinação, como o ponto G, que possui conexões hidro-rodoviária e hidro-ferroviária, constituindo-se de um terminal hidro-rodo-ferroviário.

Existe ainda um conjunto A' , com arcos que ligam os vértices O , de oferta, e os vértices D , de demanda, às redes modais, além de arcos que representam rotas diretas (monomodais), especialmente atrativas se incorrerem em custos menores que os das às rotas intermodais, como ilustrado pelos trechos $O \rightarrow P$ (de ferrovia) e $Q \rightarrow R$ (de hidrovia), também na figura 1.

Dessa forma, tem-se a seguinte definição de conjuntos, formando um grafo direcionado $G = (V, A)$, com $V = O \cup D \cup V_1 \cup V_2 \cup V_3$ e $A = T \cup A' \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3$.

- O = Vértices que representam os pontos de oferta
- D = Vértices que representam os pontos de demanda
- V_m = Vértices que representam os pontos de cada rede modal, $m = 1, 2, 3$
- A_m = Arcos de cada rede modal, $m = 1, 2, 3$
- A' = Arcos que ligam os vértices de oferta e de demanda às rede modais
- T = Arcos que representam os candidatos a terminais intermodais a serem instalados

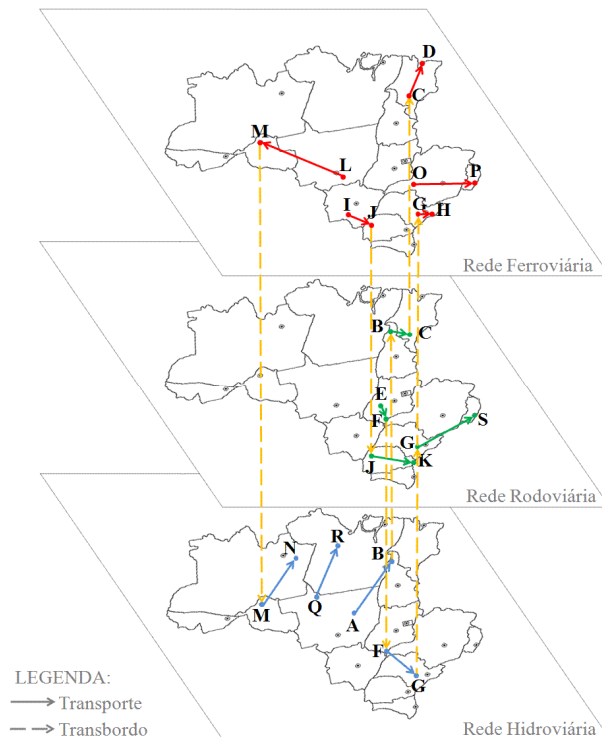


Figura 1 – Representação de rotas monomodais e multimodais em múltiplas redes de transporte

São necessários os seguintes parâmetros de entrada:

- a_i = Quantidade ofertada (t) pelo ponto i , $\{i \in O\}$
 b_j = Quantidade demandada (t) pelo ponto j , $\{j \in D\}$
 p = Número de terminais intermodais a serem instalados
 c_{ij} = Custo unitário (\$) de transportar a carga pelo arco (i, j) , $\{(i, j) \in A\}$
 u_{ij} = Limitação de capacidade de transbordo para o fluxo nos arcos (i, j) de transbordo, $\{(i, j) \in T\}$

Em relação aos custos nos arcos, é importante observar que, para arcos pertencentes a A_1 , os custos considerados deverão refletir o valor do frete rodoviário, para arcos pertencentes a A_2 , o valor dos fretes ferroviários, e assim por diante. Para arcos do conjunto T , no entanto, devem ser computados os custos de transbordo. E são definidas as seguintes variáveis:

- $y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se um terminal intermodal é instalado em } (i, j), \{(i, j) \in T\} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
 $x_{ij} = \text{Fluxo no arco } (i, j), \{(i, j) \in A\}$

O modelo pode, então, ser formulado pelas equações (1) a (8):

$$\text{Min } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in T} y_{ij} = p \quad (2)$$

$$\sum_{j|(i,j) \in A} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in O \quad (3)$$

$$\sum_{i|(i,k) \in A} x_{ik} = \sum_{j|(k,j) \in A} x_{kj} \quad \forall k \in V \setminus \{O \cup D\} \quad (4)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A} x_{ij} = b_j \quad \forall j \in D \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in T \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (7)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in T \quad (8)$$

A função objetivo (1) visa à minimização dos custos de transporte e transbordo, não considerando, dessa forma os custos de instalação para os terminais intermodais. A restrição (2) garante que exatamente p terminais sejam instalados. As restrições (3) a (5) garantem as condições de fluxo no sistema, se referindo em (3) às quantidades ofertadas, em (4) à conservação do fluxo nos nós intermediários e em (5) ao atendimento da demanda. Em (6), garante-se que só pode haver fluxo em um terminal intermodal se este for aberto e que as limitações de capacidade de transbordo sejam respeitadas. Finalmente, em (7) e (8) são definidos os domínios das variáveis, sendo as variáveis de fluxo não-negativas e as de abertura de terminais binárias.

Ressalta-se que algumas considerações adicionais podem ser facilmente incorporadas ao modelo, tais como: (i) para a consideração de restrições de capacidade para os fluxos nos arcos de transporte ferroviário e hidroviário, bastando incluir canalizações das variáveis de fluxo $x_{ij} \leq u_{ij}$, $\forall (i, j) \in A_2 \cup A_3$, associadas a estes arcos; (ii) por simplicidade, o modelo considera que o transbordo em um terminal intermodal ocorre sempre em uma única direção, como por exemplo, do modal rodoviário para o ferroviário, mas caso se deseje considerar transbordos nas duas direções em cada terminal intermodal (do modo rodoviário para o

ferroviário e vice-versa), basta substituir as restrições (2) do modelo pelas restrições:

$$\sum_{(i,j) \in T} y_{ij} = 2q \text{ e } y_{ij} = y_{ji}, \forall (i,j) \in T.$$

Observa-se também que o modelo de fluxo acima pode ser visto como um modelo de localização multiníveis, em que cada nível corresponde ao fluxo de um terminal intermodal para outro. Pode ser mostrado que o clássico modelo de p -medianas é um caso particular desse modelo. Portanto, como já foi mostrado que o modelo de p -medianas é NP-difícil, isto implica que o modelo acima também é NP-difícil.

4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Como o projeto em que o presente trabalho se insere está em fase de levantamento de dados, foram utilizados os dados do GEIPOT (2000), já realizado há alguns anos, pela indisponibilidade de dados das redes atuais. O propósito destes testes é de verificar a coerência do modelo proposto e discutir algumas possibilidades de análises de resultados obtidos, ilustrando algumas decisões que poderiam ser apoiadas a partir dessas constatações.

Os testes foram realizados em um microcomputador Core2 Duo 2.0, 4 Gb RAM, sistema operacional Windows Vista Premium, utilizando-se o *software* livre de otimização GNU GPLK e a linguagem de modelagem AMPL (FOURER *et al.* (2002)). Todos os testes foram realizados em até 0.1 s, demonstrando que não há necessidade de aquisição de licença de *software* comercial para uso do modelo em análises de sistemas do porte aqui considerado.

Os dados utilizados foram os encontrados no relatório de corredores estratégicos de desenvolvimento (GEIPOT, 2000), que considera rotas alternativas para o escoamento de soja, em duas situações distintas. Na primeira (Rede GEIPOT 2000), as rotas foram definidas segundo a configuração física do sistema em 2000, considerando dados de oferta e demanda de 1999, ajustados para 2000. Na segunda (Rede GEIPOT 2015), foram considerados o crescimento na oferta de soja, as modificações previstas na infraestrutura da rede e o deslocamento de parte da demanda dos mercados de Rotterdam para Shanghai.

São definidos 3 modais de transporte: rodoviário, ferroviário, hidroviário, este último com trechos fluviais e marítimos ou de longo curso (GEIPOT, 2000). São utilizados 11 pontos de oferta e 2 de demanda (Rotterdam e Shanghai) em todas as situações, enquanto o número de candidatos à instalação de terminais intermodais varia nos cenários estudados. As capacidades, quando não explícitas, foram consideradas como $\sum_j b_j, \{j \in D\}$. As siglas e os

nomes para as localidades utilizadas nos mapas e gráficos desta seção, bem como a sua distinção entre os conjuntos de vértices considerados, estão na tabela 1.

Tabela 1 – Siglas das localidades consideradas nas redes GEIPOT 2000 e GEIPOT 2015

Sigla	Localidade	Sigla	Localidade	Sigla	Localidade
AAR	Alto Araguaia (MT) ^t	DOU	Dourados (MS) ^{o,t}	RON	Rondonópolis (MT) ^{o,t}
ATA	Alto Taquari (MT) ^t	EST	Estreito (MA) ^t	RVE	Rio Verde (GO) ^{o,t}
BAU	Bauru (SP) ^t	GOI	Goiânia (GO) ^{o,t}	SAN	Santos (SP) ^t
BGA	Barra do Garças (MT) ^t	ITB	Itaituba (PA) ^t	SOR	Sorriso (MT) ^o
BOT	Botucatu (SP) ^t	ITC	Itacoatiara (AM) ^t	SSI	São Simão (GO) ^t
CAS	Cascavel (PR) ^t	ITG	Itaguaí (RJ) ^t	STA	Santarém (PA) ^t
CER	Ceres (GO) ^t	ITQ	Itaqui (MA) ^t	UBE	Uberlândia (MG) ^{o,t}
CDS	Chapadão do Sul (MS) ^{o,t}	NXA	Nova Xavantina (MT) ^{o,t}	VDC	Vila do Conde (PA) ^t
CGR	Campo Grande (MS) ^{o,t}	PAR	Paranaguá (PR) ^t	VIT	Vitória (ES) ^t
CNP	Campo Novo do Parecis (MT) ^o	PDL	Primavera do Leste (MT) ^o	XAM	Xambioá (TO) ^t
CRA	Cachoeira Rasteira (MT) ^t	PGR	Ponta Grossa (PR) ^t	ROTTERDAM	^d

4.1. REDE GEIPOT 2000

Primeiramente, foram gerados 20 cenários, a fim de determinar o número e as localizações ideais de terminais intermodais. Observou-se que, com menos de 4 terminais intermodais, não existe solução factível para o problema, conforme previsto em GEIPOT (2000), devido à inexistência de rotas diretas de escoamento. Com 15 terminais é possível minimizar os custos de transporte e transbordo, como mostrado na figura 2.

É interessante destacar que, com 5 terminais, Uberlândia é indicada para a localização de um terminal rodo-ferroviário e que, quando se permitem 6 terminais, este terminal não é indicado, dando lugar aos terminais de Porto Velho e Itacoatiara, permitindo o uso de uma rota rodo-hidroviária para o escoamento da oferta de Campo Novo do Parecis. A partir de 8 terminais, o terminal rodo-marítimo em Santos não foi aberto, permitindo chegadas a esse porto somente por ferrovia. Também foi possível observar que os terminais de Cascavel, Paranaguá (chegada por ferrovia), Ponta Grossa e Vitória, indicados como possibilidades na formação de rotas em GEIPOT (2000), não recebem fluxo em nenhuma das soluções e não necessitariam ser abertos.

Os fluxos ótimos observados para 15 terminais intermodais, indicados na solução de menor custo de transporte e transbordo, e coincidente com aquelas indicadas em GEIPOT (2000), são mostrados na figura 3. Observa-se que 10.682.544 t, que representam 74,42% da demanda total, são escoados pelo porto de Santos. E que desse total, 5.420.886 t (37,77% da demanda total) passam pela ferrovia, que liga Alto Taquari a Santos.

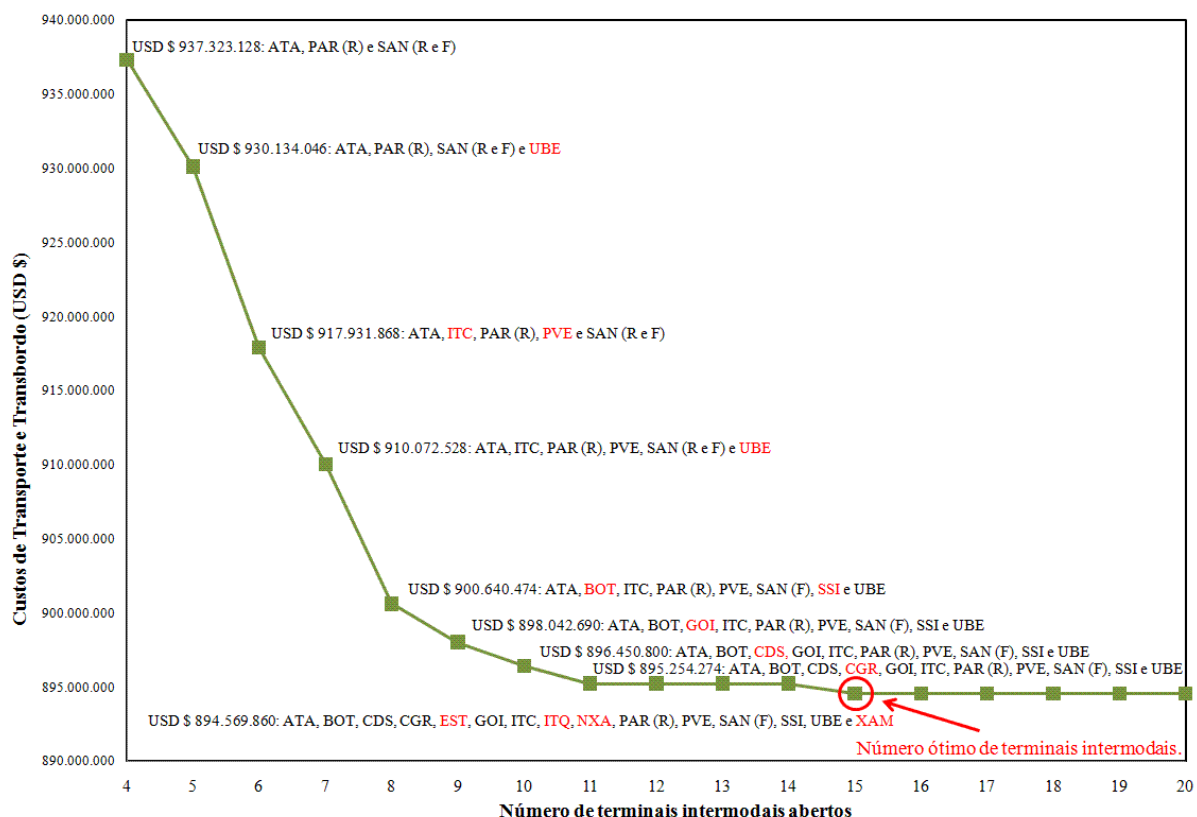


Figura 2 – Variação dos custos logísticos com o número de terminais abertos para a rede GEIPOT 2000

Em alguns casos, essa solução de fluxo de custo mínimo poderia ser infactível na prática, em função das limitações de capacidades de escoamento nos vértices e arcos da rede serem menores que as necessidades de transporte e transbordo indicadas. Foram analisados então alguns cenários para estudo desses possíveis gargalos do sistema, primeiramente para o

porto de Santos e depois para o trecho ferroviário entre Alto Taquari e Santos, administrado pela Ferronorte até Aparecida do Taboado – MS, e pela Ferrobán, a partir do marco zero do estado de São Paulo.

De acordo com a ANTAQ (2009), o porto de Santos possui capacidade de embarque de cereais entre 600 e 1.500 t/h, o que permitiria o embarque de até 13.140.000 t/ano. Com isso, verifica-se que, considerando esses dados, a solução é factível, com uma taxa de utilização média de 77,49% para o porto de Santos.

Supondo que a capacidade operacional efetiva varie em função de quebras de máquina, realização de manutenção preventiva, falta de material e atrasos diversos, a capacidade operacional média do porto pode assumir diferentes valores dentro da escala dada. Para medir os efeitos de congestionamento provocados por essas variações, foram gerados 68 cenários, variando-se o número de terminais abertos entre 4 e 20, impondo-se capacidades médias de embarque em Santos de 600, 750, 900 e 1.050 t/h.

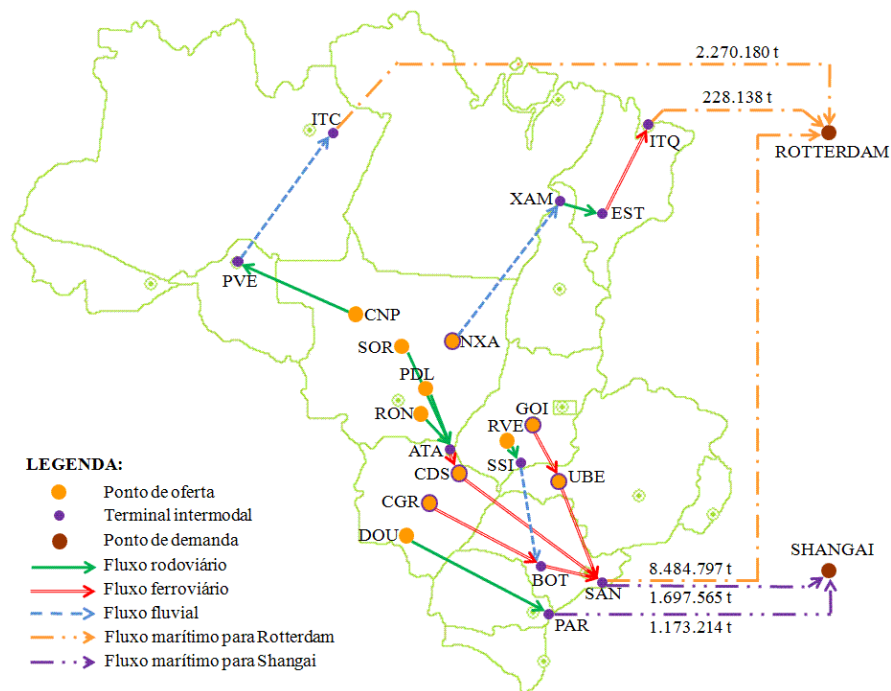
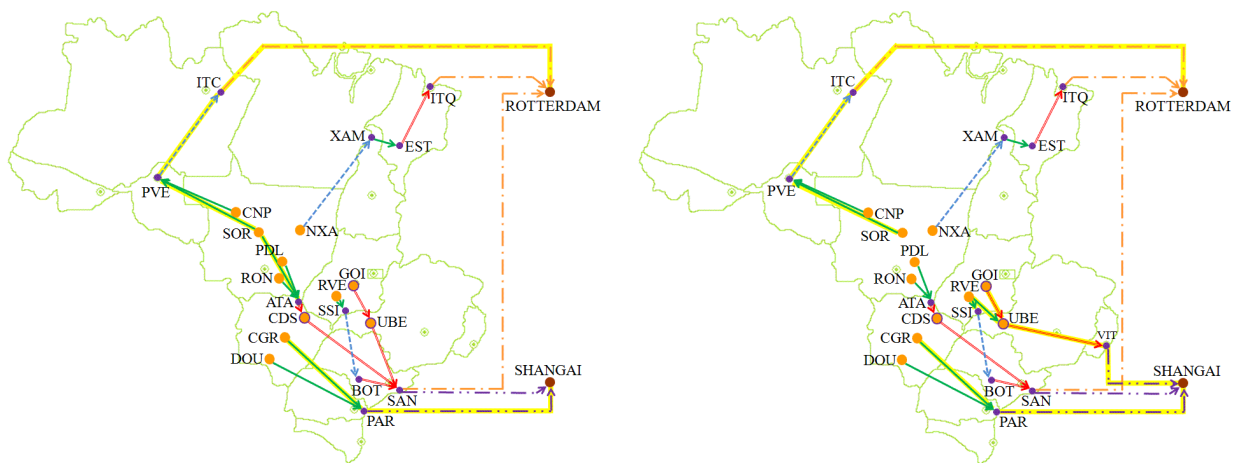


Figura 3 – Fluxos ótimos para a rede GEIPOT 2000 com 14 terminais intermodais

Como esperado, à medida que a capacidade operacional de Santos decresce, os custos crescem em até 3,09%, pois ocorrem desvios dos fluxos para outros portos da rede, porém utilizando rotas de custo mais elevado. Em relação ao número ótimo de terminais, é possível observar que se a capacidade operacional média de Santos estiver entre 900 e 1.050 t/h, são necessários apenas 14 terminais intermodais, podendo não utilizar o terminal de Campo Grande. Como se pode ver na figura 4 (a), toda a oferta de Campo Grande passa a ser transportada para Paranaguá, por rodovia, enquanto uma parte da produção de Sorriso passa a ser exportada por Itacoatiara, pela rota rodo-hidroviária que passa por Porto Velho.

Se a capacidade de Santos ficar entre 600 e 750 t/h, a opção mais econômica passa a ser a utilização do porto de Vitória para absorver as produções de Goiânia, Uberlândia e uma parte de Rio Verde, passando também toda a produção de Sorriso para o porto de Itacoatiara, como mostrado na figura 4 (b), totalizando 15 terminais intermodais.



(a) $900 \text{ t/h} \leq \text{Capacidade operacional} \leq 1.050 \text{ t/h}$ (b) $600 \text{ t/h} \leq \text{Capacidade operacional} \leq 750 \text{ t/h}$

Figura 4 – Desvios no fluxo ótimo ocasionados pelo congestionamento do Porto de Santos

Com base em dados em ANTT (2007), foram testados 34 cenários, variando-se o número de terminais intermodais e fixando-se a capacidade de fluxo na Ferronorte, em 3.222.600 t/ano e depois em 2.241.800 t/ano, que foram os fluxos registrados em 2006 e 2007, respectivamente. Em ambos os casos, o principal desvio observado nos fluxos foi o envio da soja para Santos diretamente por rodovia, a partir do Mato Grosso.

No primeiro caso, houve um aumento de apenas 0,504% nos custos totais de transporte e transbordo em relação custo ótimo para a rede não capacitada, o que representa USD \$ 4.505.520,00. O número ótimo de terminais intermodais passou de 15 para 16, possibilitando que a produção de Sorriso chegasse a Santos via rodovia, devido ao congestionamento gerado no acesso ferroviário, que possui menor custo.

No segundo, o congestionamento observado na Ferronorte foi maior, gerando aumento nos custos totais, mas este ainda não se mostram muito significativos (0,895%). Os desvios dos fluxos, no entanto, se mostraram mais aparentes, sendo que além da produção de Sorriso, parte da oferta de Rondonópolis seguiu para Santos de rodovia, enquanto a de Chapadão do Sul foi escoada pela rota rodo-hidro-ferroviária que passa por São Simão e Botucatu. O número de ótimo de terminais voltou a ser de 15, com a não utilização do terminal rodo-ferroviário de Chapadão do Sul.

4.2. REDE GEIPOT 2015

A rede GEIPOT 2015 é formada por um novo conjunto de rotas para escoamento da soja produzida nos mesmos pontos da rede GEIPOT 2000, mas considera um crescimento acentuado nas quantidades ofertadas e um deslocamento da demanda de Rotterdam para Shanghai, numa proporção de 60% e 40%. Essas novas rotas consideram, muitas vezes, novos locais candidatos a terminais intermodais, especialmente na região Norte do Brasil, com a previsão de inclusão de novos trechos de hidrovias e novos portos, como Santarém, Vila do Conde e Porto de Santana. No Sudeste, a maior modificação consiste na abertura de um terminal para exportação de grãos no porto de Itaguaí (Sepetiba), no Rio de Janeiro.

Com a finalidade de comparar os fluxos e custos dessa rede à anterior, foram gerados inicialmente 25 cenários, variando-se o número de terminais intermodais permitidos, como mostrado na figura 6. Observa-se, pela figura 5, que o número ótimo de terminais intermodais é igual a 13 e, pela figura 6, que os fluxos continentais sofreram modificações significativas. O número mínimo de terminais para tornar o problema factível agora é de 7, pela consideração de rotas que necessitam de maior número de transbordos até chegar aos destinos finais.

As ofertas da região Norte do Mato Grosso, antes divididas em rotas pelo Norte (Campo Novo do Parecis e Nova Xavantina) e Sudeste do Brasil (Sorriso), agora são totalmente escoadas pelo Norte, utilizando trechos hidroviários para a maior parte das rotas. No Sudeste, a expansão do trecho administrado pela Novoeste em Mato Grosso do Sul,

possibilitou que toda a produção do estado fosse escoada por ferrovia para os portos de Santos e Paranaguá. Também vale destacar o fato de que, mesmo visualmente, é possível perceber que houve redução do uso do modal rodoviário, de custo relativamente mais elevado. Todas as rotas rodoviárias agora se encontram dentro dos limites do estado do Mato Grosso, levando a soja das zonas produtoras até o terminal intermodal mais próximo.

Para medir a redução dos custos possibilitada por esta solução, o modelo foi resolvido considerando-se as ofertas e demandas previstas para 2015, permitindo o escoamento apenas pelas rotas previstas para a rede GEIPOT 2000. Como resultado, estimou-se uma economia de 10,69% nos custos de transporte e transbordo, obtidos para os fluxos na rede GEIPOT 2015. Esse resultado demonstra que investimentos na infraestrutura de integração entre modais podem trazer reduções significativas nos custos logísticos, indicando também que o aproveitamento de rotas intermodais de transporte poderia elevar a competitividade da soja brasileira no mercado internacional.

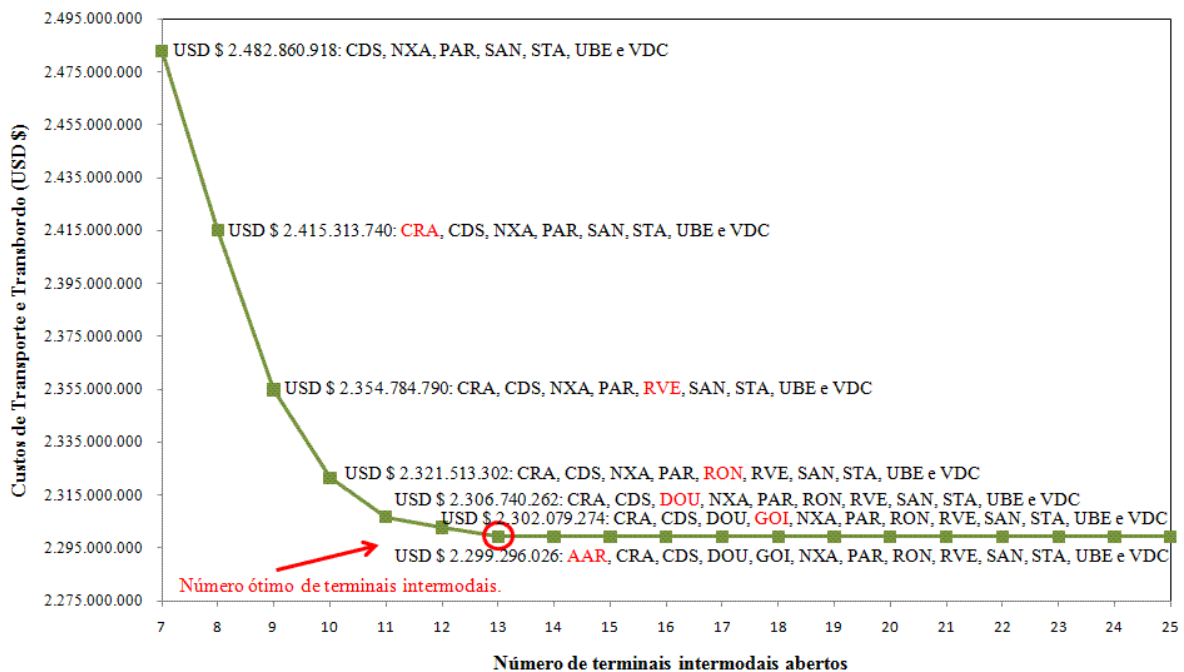


Figura 5 – Variação dos custos logísticos com o número de terminais abertos para a rede GEIPOT 2015

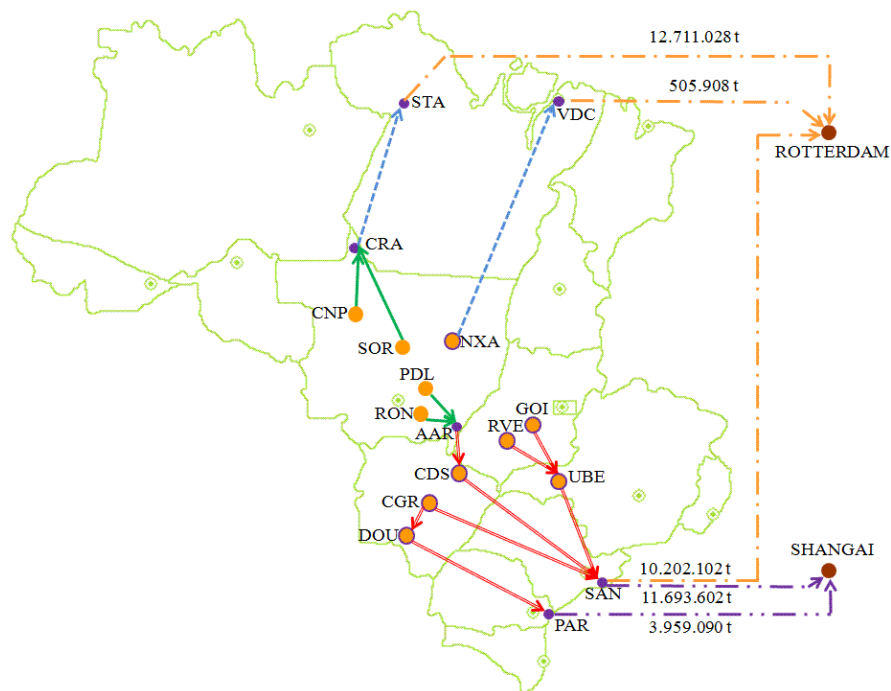


Figura 6 – Fluxos ótimos para a rede GEIPOT 2015 com 13 terminais intermodais

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo de fluxos e localização multiníveis de terminais intermodais proposto é um modelo integrado de designação e de transporte com transbordo, em que variáveis binárias de localização são usadas para tomar decisões de instalar ou não um terminal intermodal para integrar modais de transporte, e variáveis não-negativas de fluxo são usadas para alocar fluxos intermodais na rede com o menor custo possível.

O número de terminais intermodais a serem instalados é predefinido por um parâmetro de entrada do modelo, como em um modelo clássico de p -medianas. Essa escolha se baseia na simplificação da necessidade de dados a serem levantados, mas essa decisão poderia ser facilmente incorporada ao modelo, pela inclusão de custos fixos de instalação na função objetivo, retirando-se a restrição que fixa o número de terminais.

Os testes preliminares realizados utilizando os resultados publicados em GEIPOT (2000) demonstram que o modelo captura bem algumas particularidades do sistema intermodal brasileiro utilizado para o escoamento da soja em grãos para exportação, como a consideração de fluxos entre pontos de oferta e de demanda, e não entre origens e destinos predefinidos.

Os resultados apresentados ilustram algumas situações em que os resultados poderiam ser úteis para a tomada de decisões relacionadas ao projeto e planejamento do uso da rede intermodal. Além de ajudar a definir os melhores pontos para a construção de novos terminais, também é possível analisar a formação de gargalos pela concentração de fluxo, tanto nos terminais intermodais quanto nos trechos viários. A partir de estudos de cenários, pode-se dimensionar capacidades adequadas para esses gargalos ou identificar as melhores rotas para desvio dos fluxos, de acordo com níveis de custo e/ou capacidade desejados.

Apesar de o modelo ter sido testado apenas com dados bastante agregados, por exemplo, considerando uma safra completa de um ano, o mesmo tipo de análise também poderia ser feito para intervalos de tempo menores. Em particular, um estudo interessante seria avaliar cenários somente para períodos de pico, para analisar melhor a congestão e as limitações de capacidade em diversos pontos do sistema simultaneamente.

Além da imposição de diversos tipos de capacidades ao sistema (e.g., nos arcos e nós da rede), muitas outras extensões seriam interessantes e estão sendo estudadas neste mesmo projeto, como a consideração de múltiplos produtos que competem pelos mesmos modais e

outros recursos do sistema; a consideração de múltiplos períodos de análise, com possibilidade de pontos de armazenagem ao longo da rede; a consideração de pontos de consumo interno, podendo, inclusive, exportar produtos industrializados ao longo da rede, entre outros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, FAPESP e à FINEP pelo apoio a essa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANTAQ (2009). Agência Nacional de Transportes Aquaviários: porto de Santos. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/Portal/pdf/Portos/Santos.pdf>>. Acesso em 12 Mar 2009.
- [2] ANTT (2007). Agência Nacional de Transportes Terrestres: Relatório anual de acompanhamento das concessões ferroviárias – ano 2007 – FERRONORTE S. A.: Ferrovias Norte do Brasil: relatório e mapa ilustrativo. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/relatorios/ferroviario/concessionarias2007/index.asp>>. Acesso em 20 Fev 2009.
- [3] ARNOLD, P.; PEETERS, D.; THOMAS, I. (2001). Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport: formulation at extensions. *The Canadian Geographer*, 45 (3), 427-436.
- [4] ARNOLD, P.; PEETERS, D.; THOMAS, I. (2004). Modeling a rail/road intermodal transportation system. *Transportation Research Part E*, 40, 255-270.
- [5] BALLIS, A; GOLIAS, J. (2004). Towards the improvement of a combined transport chain performance. *European Journal of Operational Research*, 152, 420-436.
- [6] BULHÕES, R.; CAIXETA FILHO, J. V. (2000). Análise da distribuição logística da soja na região Centro-Sul do Brasil através de um modelo de equilíbrio espacial. *Teoria e Evidência Econômica*, 8 (15), 11-23.
- [7] CHANG, T. (2008). Best routes selection in international intermodal networks. *Computer & Operations Research*, 35, 2877 – 2891.
- [8] FERRARI, R. C. Utilização de modelo matemático de otimização para identificação de locais para instalação de unidades armazenadoras de soja no Estado do Mato Grosso. *Mestrado em Economia Aplicada*, Piracicaba: Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.
- [9] FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming, Cole Publishing Company, 2002.
- [10] GEIPOT (2009). Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes – Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes: corredores estratégicos de desenvolvimento – alternativas de escoamento de soja para exportação. Disponível em: <http://www.geipot.gov.br/estudos_realizados/soja/index.htm>. Acesso em 03 Jan 2009.
- [11] GOETZ, A. R.; RODRIGUE, J. P. (1999). Transport terminals: new perspectives. *Journal of Transport Geography*, 7, 237-240.
- [12] JARŽEMSKIENĖ, I. (2007). The evolution of intermodal transport research and its development issues. *Transport*, XXII (4), 296-306.

- [13] LIMBOURG, S.; JOURQUIN, B. (2009). Optimal rail-road container terminal locations on the European network. *Transportation Research Part E*, doi: 10.1016/j.tre.2008.12.003.
- [14] MACHARIS, C.; BONTEKONING, Y. M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: a review. *European Journal of Operational Research*, 153 (2), 400-416.
- [15] OJIMA, A. L. R. O.; YAMAKAMI, A. (2006). Modelo de programação quadrática para análise da movimentação logística e comercialização da soja brasileira. *Engenharia Agrícola Jaboticabal*, 26 (2), 552-560.
- [16] OJIMA, A. L. R. O. (2007). Transporte de soja do Estado do Mato Grosso para exportação: uma aplicação de programação linear. *Revista de Economia Agrícola*, 54 (1), 33-41.
- [17] OLIVEIRA, A. L. R. Otimização de recebimento e distribuição em unidades armazenadoras de soja. *Mestrado em Ciências*, Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005.
- [18] RACUNICA, I.; WYNTER, L. (2005). Optimal location of intermodal freight hubs. *Transportation Research Part B*, 39, 453-477.
- [19] XAVIER, C. E. O. Localização de tanques de armazenagem de álcool combustível no Brasil. *Mestrado em Economia Aplicada*, Piracicaba: Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.