



ISSN 2175-6295 Rio de Janeiro- Brasil, 12 e 13 de agosto de 2010

SELEÇÃO DE ROTAS INTERMODAIS PARA EXPORTAÇÃO DA SOJA EM GRÃO BRASILEIRA CONSIDERANDO CUSTOS E TEMPOS DE VIAGEM

Rodrigo Rocha Resende

Mônica do Amaral

Reinaldo Morabito

Universidade Federal de São Carlos

Rod. Washington Luís, km 35, Monjolinho, São Carlos – SP, CEP: 13.565-905

rrresende1@yahoo.com.br, monica@dep.ufscar.br, morabito@ufscar.br

Resumo: A consideração de rotas intermodais de transporte pode ser útil em diversas situações, como no caso do escoamento de produtos agrícolas para exportação. No Brasil, destaca-se o potencial de aplicação do transporte intermodal para redução de custos logísticos e aumento da competitividade da soja em grão exportada, pois grandes distâncias separam as áreas de produção e os principais portos. Propõe-se, nesse contexto, um modelo para seleção de rotas intermodais com o objetivo de minimização dos custos e dos tempos de viagem. Admitem-se economias de escala nas operações realizadas e janelas de tempo para entrega nos pontos de demanda. A estrutura de transporte intermodal é representada por múltiplas redes, com conservação de fluxo tanto no transporte quanto no transbordo da carga. Alguns testes preliminares realizados com instâncias baseadas em dados secundários servem para verificar a coerência do modelo e ilustrar o seu potencial de aplicação para analisar um conjunto de cenários.

Palavras-chave: Seleção de rotas; transporte intermodal; exportação de soja, tempos de viagem.

Abstract: The consideration of intermodal routes for transport can be advantageous in several situations, such as in cases of flows of agricultural products to export. In Brazil, there is a potential application of intermodal transport approaches to reduce logistic costs and increase the competitiveness of soybeans exported, because of the long distances separating the production areas and the main ports. In this context, we propose a model for intermodal routes selection, with the objective of minimizing costs and travel times. There are economies of scale in operations and time windows for delivery to the destination points. The structure of intermodal transport is represented by multiple networks, with preservation of flow in both transmission and in the transshipment of cargo. Some preliminary tests with instances based on secondary data are used to check the model consistency and to illustrate the potential of its application to analyze a set of scenarios.

Key words: Routes selection, intermodal transport, soybean exports, traveling times.

1. INTRODUÇÃO

A soja, considerada como uma das culturas mais importantes do agronegócio brasileiro, atualmente ocupa grandes extensões de terras e se distribui por todas as regiões do país, contabilizando cerca de 20 milhões de hectares (MENDES & PADILHA JR., 2008). Em termos econômicos, o complexo da soja contribui de forma significativa para o *superávit* da balança comercial, tendo movimentado cerca de US\$ 17,24 milhões em exportações em 2009, sendo a exportação do grão *in natura* responsável por 66,26% desse total (ABIOVE, 2010).

A gestão da logística de escoamento da soja em grão para exportação não é uma tarefa simples de ser realizada. Diversos fatores impõem uma série de dificuldades para a manutenção e o aumento da competitividade da soja brasileira nos mercados internacionais. Dentre eles, destacam-se as grandes distâncias a serem percorridas entre as áreas de plantio, geograficamente muito dispersas, e os principais portos. A forte dependência do transporte rodoviário, a precariedade e existência de muitos postos de pedágio das rodovias levam a um considerável aumento dos custos (MEREGE & ASSUMPÇÃO, 2002), enquanto efeitos de congestionamento nos portos provocam atrasos no embarque e o não cumprimento dos prazos de entrega estabelecidos em contratos (OJIMA, 2006).

Nesse contexto, aponta-se a utilização racional do transporte intermodal como forma de aumentar a eficiência dos serviços prestados e garantir a competitividade brasileira frente aos seus principais concorrentes, os EUA e a Argentina. A realização de estudos relacionados ao tema é crescente, podendo-se citar algumas iniciativas importantes, como o estudo realizado pelo GEIPOT (2001) e o Projeto ALOGTRANS, atualmente financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia). Ainda em andamento, esse projeto já apresenta alguns resultados em termos de levantamento dos custos logísticos da soja (KUSSANO & BATALHA, 2009) e de modelagem de problemas de localização de terminais intermodais (AMARAL *et al.*, 2009).

No presente trabalho, tem-se por objetivo apresentar um modelo de otimização para seleção de rotas intermodais para escoamento da soja em grão brasileira destinada à exportação. O trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2, apresenta-se uma breve revisão de literatura, destacando-se alguns estudos de transporte intermodal relacionados à minimização de custos de roteirização na rede logística. Na seção 3, o problema e o modelo de seleção de rotas intermodais considerando custos e tempos de viagem são formalizados. A seguir, na seção 4, apresentam-se os resultados computacionais preliminares, obtidos a partir de instâncias baseadas em dados secundários. Encerra-se o trabalho, na seção 5, com algumas considerações a respeito da aplicabilidade do modelo e perspectivas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O termo transporte intermodal pode ser definido como o movimento de cargas entre uma origem e um destino por pelo menos dois modais diferentes (CHANG, 2008). No Brasil, de acordo com a Lei 9.611/98, a denominação correta é transporte multimodal, devendo o serviço logístico prestado ser regido por um contrato único para todo o percurso. Além do transporte, o operador logístico multimodal pode oferecer serviços de coleta, consolidação ou desagregação de carga, armazenagem e entrega (ANTT, 2010). Apesar disso, utilizar-se-á aqui a denominação transporte intermodal, que é bem usual na comunidade científica.

Macharis & Bontekoning (2004) formalizaram algumas classes de problemas de Pesquisa Operacional em transporte intermodal, 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.

Os problemas de roteirização em redes intermodais, classe na qual este trabalho está

inserido, envolvem decisões de caráter operacional. O foco principal dos trabalhos se concentra em selecionar as rotas mais adequadas, dado o objetivo do decisor, entre origens e destinos. Devido às inúmeras possibilidades de combinações de rotas entre os modais, esses problemas são mais complexos que aqueles que envolvem um único modal. As principais restrições se concentram no balanço dos fluxos de transporte e transbordo e limitações de capacidade, inserindo os trabalhos no contexto de fluxos em redes. Em geral, o objetivo envolve uma função de minimização de custos ou de tempos de viagem, ou ambas.

Dentre os trabalhos revisados, alguns consideram apenas os custos de frete, como Boardman *et al.* (1997), que propuseram um sistema georreferenciado com um algoritmo de varredura dupla para encontrar rotas de custo mínimo em redes de transporte rodo-ferro-hidroviárias. Southworth & Peterson (2000) propuseram um sistema com objetivos e características semelhantes, porém utilizando simulação. Groothede *et al.* (2005), por sua vez, desenvolveram e aplicaram um modelo para gerenciamento de uma rede de consolidação intermodal (*hub-and-spoke network*) para obtenção de economias de escala na Holanda.

A consideração de custos e tempos de viagem pode ser encontrada em Bookbinder & Fox (1998), que resolveram problemas reais de roteirização intermodal entre o Canadá e o México oriundos das transações do NAFTA (Tratado de Livre Comércio na América do Norte). Picard & Gaudry (1998) propuseram um modelo que considera também a variabilidade do tempo de viagem. Mais recentemente, Chang (2008) propôs um modelo que considera economias de escala e janelas de tempo de entrega em uma cadeia logística de distribuição de monitores LCD de Taiwan para os EUA, utilizando relaxação Lagrangeana e um algoritmo de factibilização, necessário para atendimento das restrições de capacidade.

Outras estruturas de custos podem ainda ser encontradas, como no caso do trabalho de Park *et al.* (1999), que utiliza equações de equilíbrio de Nash em um modelo de fluxos em redes para determinar rotas rodo-ferroviárias para o transporte de grãos nos EUA. Min (1991) utilizou um modelo de programação por metas com restrições de chance para determinar rotas em um canal de distribuição internacional, considerando custos, atendimento das demandas, tamanho médio das rotas, capacidade, velocidade, disponibilidade, confiabilidade e riscos de acidente. Já Barnhart & Ratliff (1993) compararam rotas rodoviárias e rodo-ferroviárias com base nos custos totais, incluindo a coleta e a transferência das cargas, além dos custos de estoque em trânsito e de segurança, para amortecer variações no tempo de viagem.

No Brasil, encontram-se diversos trabalhos para auxiliar decisões intermodais no agronegócio. Como exemplos de desenvolvimento de modelos matemáticos, têm-se Bulhões & Caixeta Filho (2000) e Ojima & Yamakami (2006), que utilizaram modelos de equilíbrio espacial de preços para analisar os fluxos da soja em diferentes contextos reais. Mais recentemente, Ojima (2007) utilizou um modelo de transportes para analisar rotas rodoviárias e intermodais para exportar a soja produzida no Mato Grosso. Outras abordagens também são empregadas, como no trabalho de Dalto (2003), que desenvolveu uma ferramenta de simulação para avaliar estratégias logísticas e financeiras para comercialização de uma safra de soja; Naves (2007), que propôs um método de cálculo para avaliar fretes rodoviários e intermodais para escoamento dos estoques públicos de milho; e Oliveira (2007), que construiu um sistema multicritério para seleção de rotas intermodais para exportação de soja.

Embora várias contribuições importantes já tenham sido dadas, ainda é possível apontar diversas oportunidades de pesquisas envolvendo a seleção de rotas intermodais para exportação de produtos agroindustriais. Dentre elas, a possibilidade de desenvolver e aplicar modelos com considerações mais realistas de custos. Nesse contexto, dois trabalhos interessantes são de Ojima (2007), que separa os custos de fretes em rotas inferiores ou superiores a 500 km, e o de Junqueira & Morabito (2006), que analisam como a consideração do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) pode levar a reduções significativas nos custos de produção e logística de sementes de milho. Porém, não se tem conhecimento de nenhum trabalho anterior que trate de economias de escala, obtidas pelo uso de diferentes composições de trens e barcaças, nem que considerem o maior tempo gasto nas

operações de transbordo e no uso de modais mais lentos que o rodoviário.

3. SELEÇÃO DE ROTAS INTERMODAIS COM CUSTOS E TEMPOS DE VIAGEM

O problema a ser analisado consiste em, dadas as ofertas de soja em grão, definir as melhores rotas intermodais para fazer a roteirização do fluxo de forma a atender às demandas para exportação, de acordo com critérios de custos e tempos de viagem. O sistema é modelado como um grafo direcionado $G = (N, E)$, com $|N|$ vértices e $|E|$ arcos, em que as ofertas partem de vértices contidos em um subconjunto $O \subseteq N$ e são entregues em outro subconjunto de vértices $D \subseteq N$. Para cada demanda j , existe uma janela de tempo de entrega, $[l_j, u_j]$, em que l_j é a data mais cedo e u_j é a data mais tarde que são admissíveis para o atendimento da demanda. Admite-se que $l_j \leq u_j$ e que $u_j - l_j < \infty$ para todo vértice de D .

Os custos de transporte e transbordo na rede são representados por funções côncavas para representar economias de escala, dependendo da quantidade de soja em grão transportada, e sendo representados por funções contínuas lineares por partes, como a mostrada na figura 1. Cada segmento linear $r \in R$, está limitado inferior e superiormente pelas quantidades M_{ij}^{r-1} e M_{ij}^r , respectivamente. Associam-se a cada segmento um custo fixo f_{ij}^r e um custo variável c_{ij}^r . Além desses, deseja-se também minimizar maior tempo gasto para o transporte da soja em grão nas rotas intermodais, ou o *makespan*, respeitando as janelas de tempo de entrega. Para isso, uma parcela ponderada pela importância desse critério e definida pelo decisor, é acrescentada à função objetivo.

Além dos conjuntos de vértices N , O e D , de arcos E , e de segmentos de custos R para cada arco (i, j) , já descritos, o modelo está baseado nos seguintes parâmetros:

- f_{ij}^r = Custo fixo para o arco $(i, j) \in E$ no segmento $r \in R$
- c_{ij}^r = Custo variável para o arco $(i, j) \in E$ no segmento $r \in R$
- M_{ij}^r = Limitantes para as quantidades a serem transportadas nos segmentos $r-1$ e $r \in R$ para cada arco $(i, j) \in E$
- t_{ij} = Tempo de fluxo no arco $(i, j) \in E$
- l_j = Data mais cedo da janela de tempo para entrega em $j \in D$
- u_j = Data mais tarde da janela de tempo para entrega em $j \in D$
- a_i = Quantidade de soja em grão ofertada pelo vértice de oferta $i \in O$
- d_j = Quantidade de soja em grão demandada pelo vértice de demanda $i \in D$
- α = Fator de importância do tempo de viagem para o decisor, $\alpha \geq 0$
- M** = Constante “muito grande” (big **M**)

Definem-se ainda as seguintes variáveis para o problema:

- x_{ij}^r = Fluxo de soja no arco $(i, j) \in E$ na faixa $r \in R$ de custos
- y_{ij}^r = $\begin{cases} 1, & \text{se a faixa de custos } r \in R \text{ é selecionada no arco } (i, j) \in E \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- A_i = Data de chegada da soja ao vértice $i \in N$
- A_{\max} = Maior data de chegada da soja aos vértices de demanda (*makespan*)

O modelo pode, então, ser formulado pelas equações (1) a (16) a seguir:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in E} \sum_{r \in R} [f_{ij}^r y_{ij}^r + c_{ij}^r (x_{ij}^r - M_{ij}^{r-1} y_{ij}^r)] + \alpha A_{\max} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N \setminus (i, j) \in E} \sum_{r \in R} x_{ij}^r = a_i \quad \forall i \in O \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N \setminus (i, k) \in E} \sum_{r \in R} x_{ik}^r = \sum_{j \in N \setminus (i, j) \in E} \sum_{r \in R} x_{kj}^r \quad \forall k \in N \setminus \{O \cup D\} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N \setminus (i, j) \in E} \sum_{r \in R} x_{ij}^r = d_j \quad \forall j \in D \quad (4)$$

$$x_{ij}^r \geq M_{ij}^{r-1} y_{ij}^r \quad \forall (i, j) \in E, \forall r \in R \quad (5)$$

$$x_{ij}^r \leq M_{ij}^r y_{ij}^r \quad \forall (i, j) \in E, \forall r \in R \quad (6)$$

$$\sum_{r \in R} y_{ij}^r \leq 1 \quad \forall (i, j) \in E \quad (7)$$

$$A_j \geq A_i + t_{ij} - \mathbf{M} (1 - y_{ij}^r) \geq 0 \quad \forall (i, j) \in E \mid i \neq j, \forall r \in R \quad (8)$$

$$A_j \geq l_j \quad \forall j \in D \quad (9)$$

$$A_j \leq u_j \quad \forall j \in D \quad (10)$$

$$A_{\max} \geq A_j \quad \forall j \in D \quad (11)$$

$$x_{ij}^r \geq 0 \quad \forall (i, j) \in E, \forall r \in R \quad (12)$$

$$y_{ij}^r \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in E, \forall r \in R \quad (13)$$

$$A_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (14)$$

A função objetivo (1) visa à minimização dos custos e do maior tempo de viagem, de forma ponderada pelo fator α . As restrições (2) a (4) têm por função garantir o balanço de massa no sistema, referindo-se em (2) ao escoamento da soja ofertada, à conservação de fluxo nos pontos intermediários em (3), enquanto (4) se refere ao atendimento das demandas. As restrições (5) e (6) obrigam à escolha dos limites inferior e superior adequados ao segmento utilizado para representação dos custos de transporte e transbordo. Em (7), assegura-se que no máximo um segmento de custos seja selecionado. A restrição (8) é utilizada para determinar a data de chegada da soja a um vértice, considerando o tempo de fluxo no arco mais a data de saída do vértice anterior. As restrições descritas pelas equações (9) e (10) impõem os limites inferior e superior das janelas de tempo nos vértices de demanda. Em (11), o *makespan* é computado. Nas restrições (12) a (14) definem-se os domínios das demais variáveis.

Para a representação de rotas intermodais no modelo, utilizou-se a notação de múltiplos níveis proposta por Arnold *et al.* (2004) e apresentada na figura 2. Cada modal $m = 1, 2, 3$ é representado por um grafo $G_m = (N_m, E_m)$, em que N_m e E_m representam os vértices e os arcos do modal m . Os arcos de transporte estão representados por setas horizontais cheias, enquanto os terminais intermodais são mostrados nas setas verticais tracejadas, pertencem a um conjunto específico de arcos, denominado E_T , que ligam duas redes de transporte distintas. O grafo G do problema passa a ser formado pelos vértices $N = O \cup D \cup N_1 \cup N_2 \cup N_3$, enquanto o conjunto de arcos é definido por $E = E_1 \cup E_2 \cup E_3 \cup E_T \cup E'$, sendo E' o conjunto de arcos que ligam os vértices de oferta e demanda à rede de transporte.

Além da simplicidade, essa representação é útil para a representação de rotas com múltiplos transbordos, como é o caso da rota $\mathbf{G3} \rightarrow \mathbf{H3} \rightarrow \mathbf{H1} \rightarrow \mathbf{I1} \rightarrow \mathbf{I2} \rightarrow \mathbf{J2}$, que passa por dois terminais, enquanto em $\mathbf{A1} \rightarrow \mathbf{B1} \rightarrow \mathbf{B2} \rightarrow \mathbf{C2}$ e em $\mathbf{D1} \rightarrow \mathbf{E1} \rightarrow \mathbf{E3} \rightarrow \mathbf{F3}$ apenas um terminal intermodal é utilizado. Para facilitar a identificação das adaptações realizadas na elaboração do modelo, as principais premissas consideradas são contrastadas com os trabalhos

utilizados como referência na tabela 1.

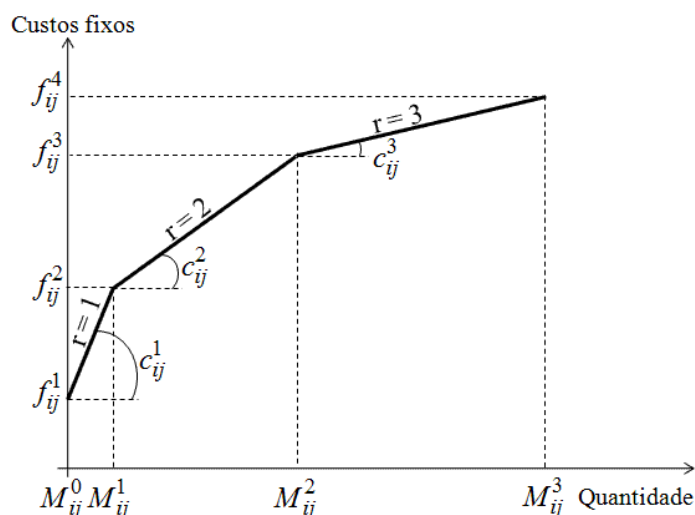


Figura 1 – Representação dos custos de transporte

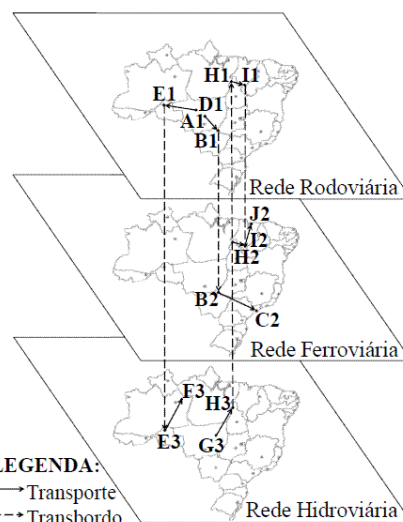


Figura 2 – Rede de transporte intermodal

Tabela 1 – Comparação do modelo proposto com os trabalhos utilizados como referência

Adaptação Proposta	Arnold <i>et al.</i> (2004)	Chang (2008)
Decisões de fluxo	Pacotes unitários	Decisões de fluxo
Oferta – Demanda	Origem - Destino	Origem – Destino
Fluxo unidirecional	Fluxo bidirecional	Fluxo unidirecional
Com restrições de capacidade	Sem restrições de capacidade	Com restrições de capacidade
Transbordos nos arcos	Transbordos nos arcos	Transbordos nos vértices
Modais rodoviário, ferroviário e hidroviário	Modais rodoviário e ferroviário	Modais rodoviário, ferroviário, hidroviário e aéreo

4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os testes foram realizados em um microcomputador Core 2 Duo 2.0, 4 Gb de RAM, sistema operacional Windows Vista Home Premium, utilizando-se o AMPL/CPLEX 11.1 (FOURER *et al.*, 2002). Os dados utilizados basearam-se principalmente no estudo do GEIPOT (2001), referente aos corredores estratégicos de desenvolvimento, que considerou rotas alternativas para o escoamento da soja em grão em dois cenários distintos: 2000 e 2015.

Em relação à rede de transportes, utilizou-se somente a estrutura física disponível em 2000, visto que as projeções de investimentos previstas para 2015 ainda não foram totalmente concluídas. Foram considerados 10 dos 15 pontos de oferta, excluindo-se aqueles que não apresentavam levantamento de rotas ou não tinham grandes interações com as demais regiões consideradas. Foram mantidos os dois pontos de demanda, que são os principais mercados consumidores internacionais da soja brasileira. As localidades consideradas, bem como as siglas utilizadas nos mapas da seção são apresentadas na tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Localidades consideradas na Rede GEIPOT 2000

Sigla	Localidade	Sigla	Localidade	Sigla	Localidade
ATA	Alto Taquari (MT)	GOI	Goiânia (GO) °	SAN	Santos (SP)
BOT	Botucatu (SP)	ITC	Itacoatiara (AM)	SOR	Sorriso (MT) °
CAS	Cascavel (PR)	PAR	Paranaguá (PR)	SSI	São Simão (GO)
CDS	Chapadão do Sul (MS) °	PDL	Primavera do Leste (MT) °	UBE	Uberlândia (MG) °
CGR	Campo Grande (MS) °	PGR	Ponta Grossa (PR)	VIT	Vitória (ES)
CNP	Campo Novo do Parecis (MT) °	RON	Rondonópolis (MT) °	ROTTERDAM	^d
DOU	Dourados (MS) °	RVE	Rio Verde (GO) °	SHANGAI	^d

° Pontos de oferta, ^d Pontos de demanda

Os dados de custos, de produção e de demanda foram atualizados, devido à disponibilidade de algumas informações mais recentes. Como principais bases consultadas, podem-se citar: (i) a ANTT (2007), para obtenção dos dados de capacidade e de custos nas

ferrovias; (ii) o IBGE (2009), para atualização dos dados de produção de soja; (iii) o SIFRECA (2010), para atualização dos valores de fretes rodoviários; (iv) o Guia Quatro Rodas (2010) e o Google Maps (2010) para a estimação dos tempos de viagem, considerando o número de pistas e o estado de conservação das estradas em relação à pavimentação.

Primeiramente, dois cenários foram utilizados para comparar os efeitos da minimização dos custos e dos tempos de viagem sobre a rede. Os resultados obtidos em termos de fluxos ótimos são mostrados nas figuras 3 e 4. Na figura 3, têm-se os fluxos de custo mínimo, obtidos a partir da consideração apenas da primeira parcela da função objetivo. Esses resultados são coincidentes com os descritos em GEIPOT (2001), mostrando que o modelo é capaz de reproduzir os resultados do principal estudo utilizado como fonte de dados.

Observa-se que a intermodalidade da rede privilegia a redução dos custos de viagem, uma vez que apenas a produção de Dourados utiliza uma rota rodoviária no escoamento da soja para o porto de Paranaguá. As demais regiões de oferta utilizam-se dos modais ferroviário e hidroviário em suas rotas de exportação, utilizando até mesmo rotas totalmente ferroviárias quando estas estão disponíveis, como nos casos das regiões de Goiânia, Uberlândia, Chapadão do Sul e Campo Grande. Segmentos de hidrovias são utilizadas no escoamento da soja de Campo Novo do Parecis, por uma rota rodo-hidroviária para o porto de Itacoatiara que passa por Porto Velho, e de Rio Verde, em que uma rota rodo-hidro-ferroviária é usada até o porto de Santos, passando pelos terminais de São Simão e Botucatu.

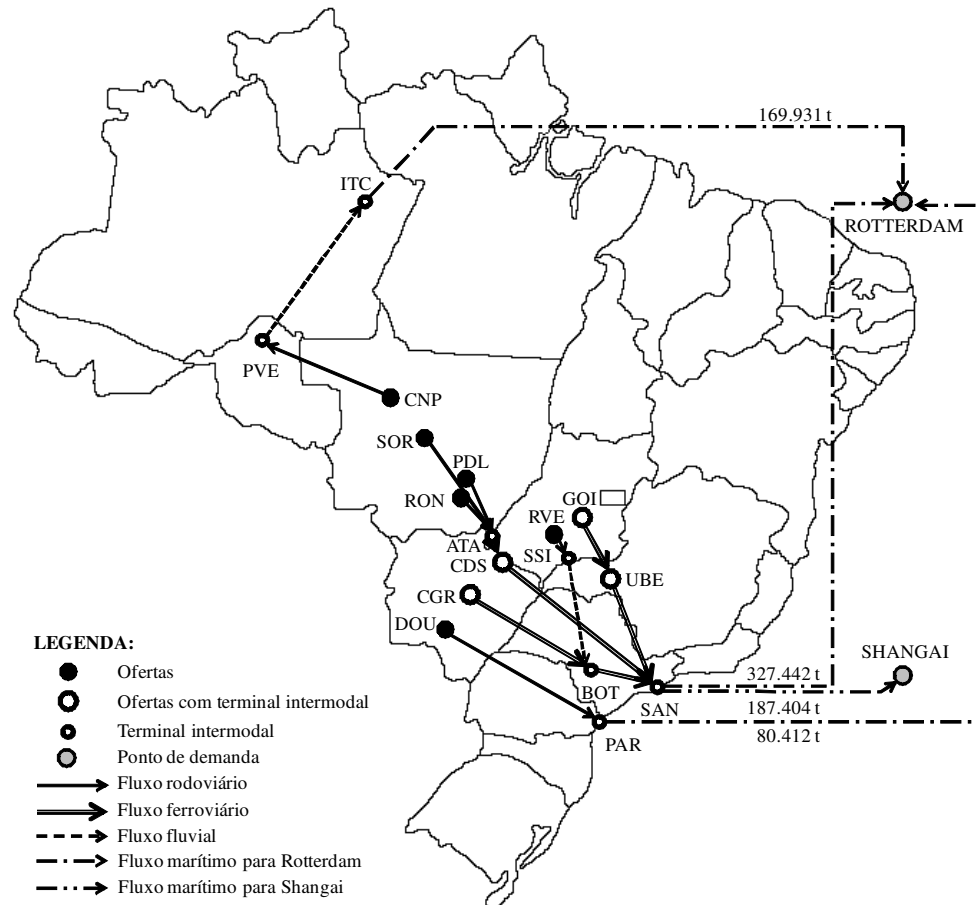


Figura 3 – Solução ótima com minimização dos custos de transporte e transbordo

No segundo cenário, a função objetivo considerou apenas a minimização de A_{max} . Os fluxos ótimos obtidos, e ilustrados na figura 4, mostram que as rotas rodoviárias, apesar de mais caras, são as que levam à redução dos tempos de viagem para todas as regiões de oferta. Novamente, a soja de Dourados foi enviada para o porto de Paranaguá por rodovia, mostrando que nesse caso a rota mais barata e a mais rápida são coincidentes. O intenso fluxo para o porto de Santos por rodovia, que ocorreu para 8 dos 10 pontos de oferta, confirma a importância desse porto para as exportações brasileiras. No modelo, tal fato pode ser

explicado pelas menores distâncias a serem percorridas e também às condições atuais das rodovias de acesso a esse porto. Somente as regiões de Campo Grande e Dourados, no Mato Grosso do Sul, escoaram suas produções pelo porto de Paranaguá que, para essas regiões, tem tempo de viagem inferior às rotas de acesso ao porto de Santos.

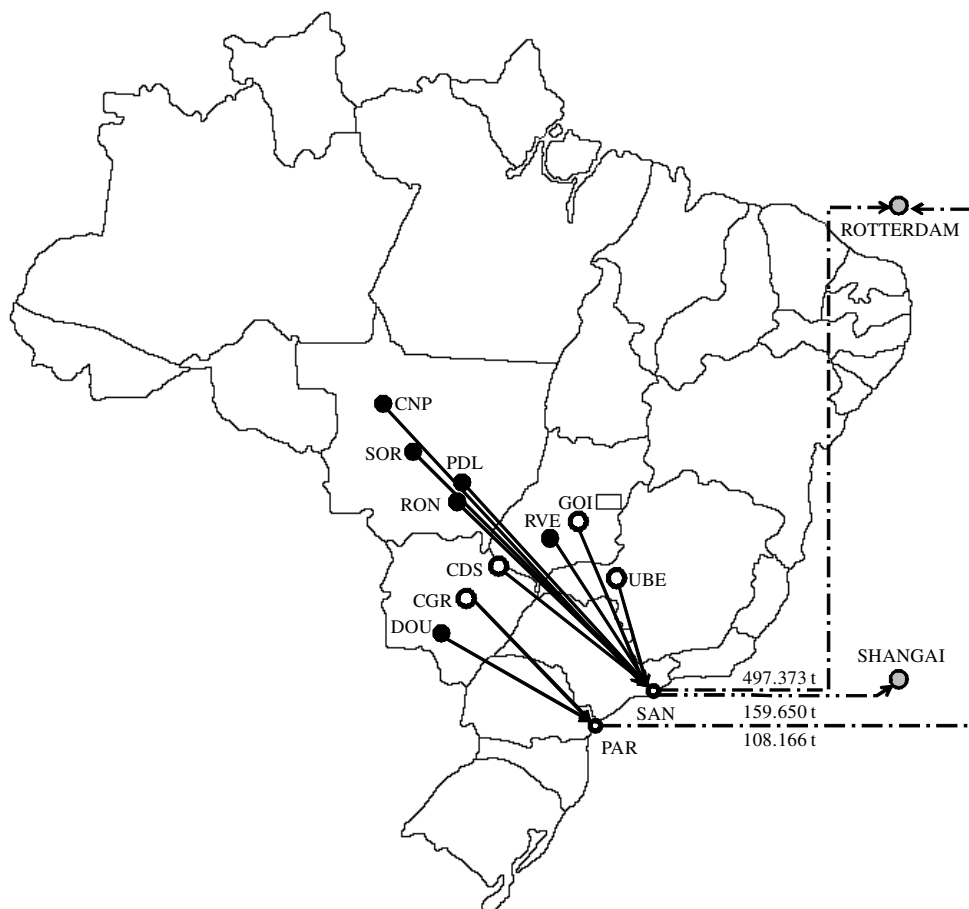


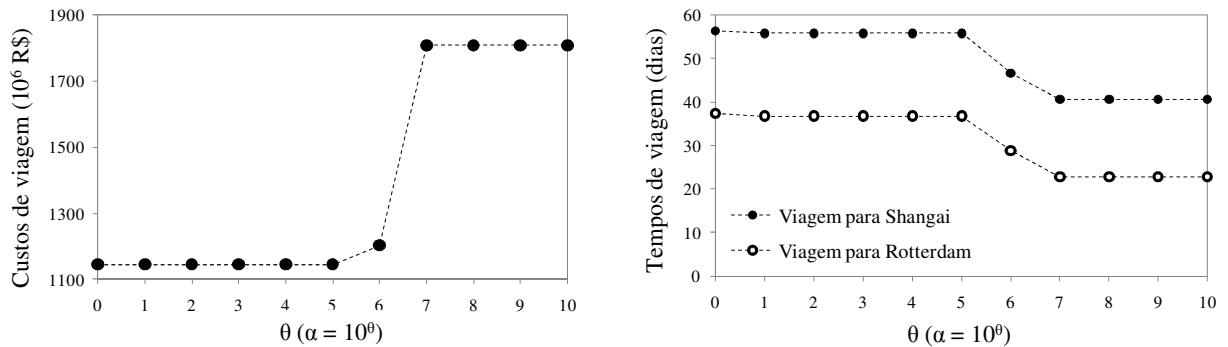
Figura 4 – Solução ótima com minimização dos tempos de viagem

A partir desses dois resultados, outros conjuntos de testes foram realizados. A figura 5 mostra os resultados dos cenários em que o parâmetro α foi variado, recebendo valores entre 0 e 10^{10} . À medida que o valor de α aumenta, os custos de transporte e transbordo na rede crescem, como mostra a figura 5(a). Como o parâmetro α reflete a importância dada pelo decisor à redução do maior tempo de viagem (*makespan*), novas rotas, mais rápidas, porém mais caras são selecionadas. Em comparação com o cenário 1, o cenário 2 apresenta um aumento de 57,92% dos custos de viagem, compostos pelos custos de frete nas vias e transbordo nos terminais intermodais e portos. Os tempos de viagem, mostrados na figura 5(b) decrescem com o aumento no valor de α , sendo os *leadtimes* de entrega da rota mais rápida de 23 dias para Rotterdam e 41 dias para Shanghai, que representam reduções de 15 e 16 dias em relação ao cenário 1, respectivamente. A figura 5(c) mostra os tempos de processamento de cada um dos testes realizados, mostrando diferenças bastante significativas entre eles.

Quando $\alpha = 10^6$, a solução obtida apresenta um compromisso entre a redução dos custos e dos tempos de viagem. Os fluxos obtidos são bastante semelhantes aos da figura 3. Ocorre desvio apenas do fluxo de Rio Verde, que passa a escoar sua produção para Santos por uma rota rodo-ferroviária que passa por Uberlândia. Esse desvio ocasiona economia de 7,88 horas no *leadtime* de entrega em Rotterdam e de 9,21 horas para Shanghai. Essa rota evita o uso da hidrovia entre São Simão e Botucatu, que dura aproximadamente 9 dias. Apesar disso, a redução do *makespan* não é muito significativa, uma vez que toda a soja destinada a um porto deve estar disponível e embarcada antes que o navio possa partir ao seu destino final.

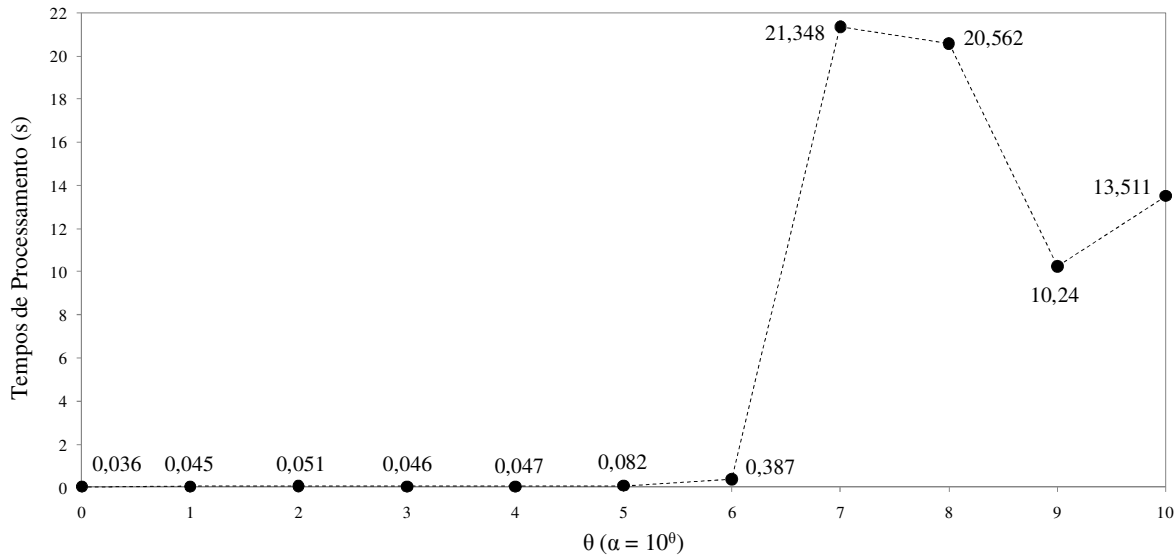
Nesses três cenários, é possível verificar a intensa utilização do porto de Santos nas rotas de exportação da soja brasileira. A tabela 3 mostra as porcentagens para cada destino e

da demanda total que passam nesse porto em cada um dos cenários destacados anteriormente. Observam-se valores altos em todos os casos, sendo as porcentagens ainda mais altas quando a redução do *makespan* é mais importante. A fim de avaliar possíveis efeitos de congestionamento no porto de Santos, foi gerado um novo conjunto de cenários, em que o tempo de processamento da soja nesse porto foi progressivamente aumentado, de forma a simular as longas filas de espera que se formam durante o período de safra. As janelas de tempo nas regiões de demanda foram mantidas em 29 dias para Rotterdam e 47 dias para Shangai, conforme o cenário em que $\alpha = 10^6$, a fim de manter uma base para comparação.



(a) $\alpha \times$ Custos de viagem

(b) $\alpha \times$ Tempos de viagem



(a) $\alpha \times$ Tempo de processamento

Figura 5 – Comportamento do modelo com a variação do parâmetro α

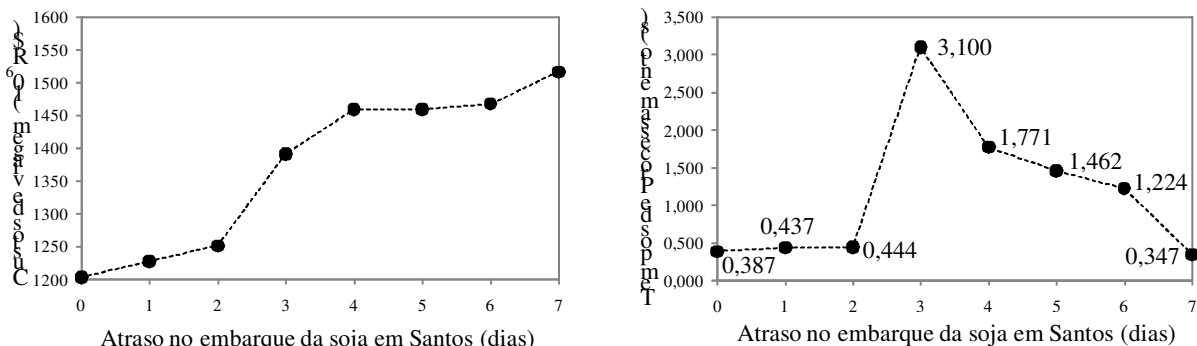
Tabela 3 – Porcentagem da soja exportada que passa pelo porto de Santos

Cenário	Com destino a Rotterdam	Com destino a Shangai	Demanda Total
$\alpha = 0$	49,67	100,00	67,28
$\alpha = 10^6$	49,67	100,00	67,28
$\alpha = 10^{10}$	66,12	100,00	77,98

Os resultados obtidos para esse conjunto de testes mostram que, à medida que ocorrem atrasos no embarque em Santos, os fluxos da soja são desviados progressivamente para os portos de Vitória e Paranaguá. Na figura 6(a), observa-se o impacto desses desvios de fluxos nos custos de viagem. A cada dia de atraso que é adicionado ao transbordo nesse porto, os custos podem aumentar ou se manter constantes, dependendo das opções para desvios de rotas. Na figura 6(b), os tempos gastos no processamento dos testes são apresentados, porém com menor variabilidade quando comparado ao conjunto de testes anteriormente apresentado.

Na figura 7 apresenta-se o padrão de fluxos obtido quando se tem 3 dias de atraso para o embarque da soja no porto de Santos. Em relação ao fluxo de custo mínimo para a rede,

verifica-se que as produções de Sorriso, Primavera do Leste, Rondonópolis, Rio Verde, Goiânia e Uberlândia são escoadas por rotas menos econômicas. As duas primeiras passam a usar rotas rodoviárias para chegar a Santos, enquanto as quatro últimas são desviadas para o porto de Vitória. Goiânia e Uberlândia mantêm rotas exclusivamente ferroviárias, apesar da mudança de porto, enquanto a soja que parte de Rio Verde e de Rondonópolis utiliza trechos rodoviários para ter acesso à Estrada de Ferro Vitória – Minas, em Uberlândia.



(a) Atrasos em Santos x Custos de viagem (b) Atrasos em Santos x Tempo de Processamento
 Figura 6 – Comportamento do modelo com introdução de atrasos para o embarque da soja em Santos

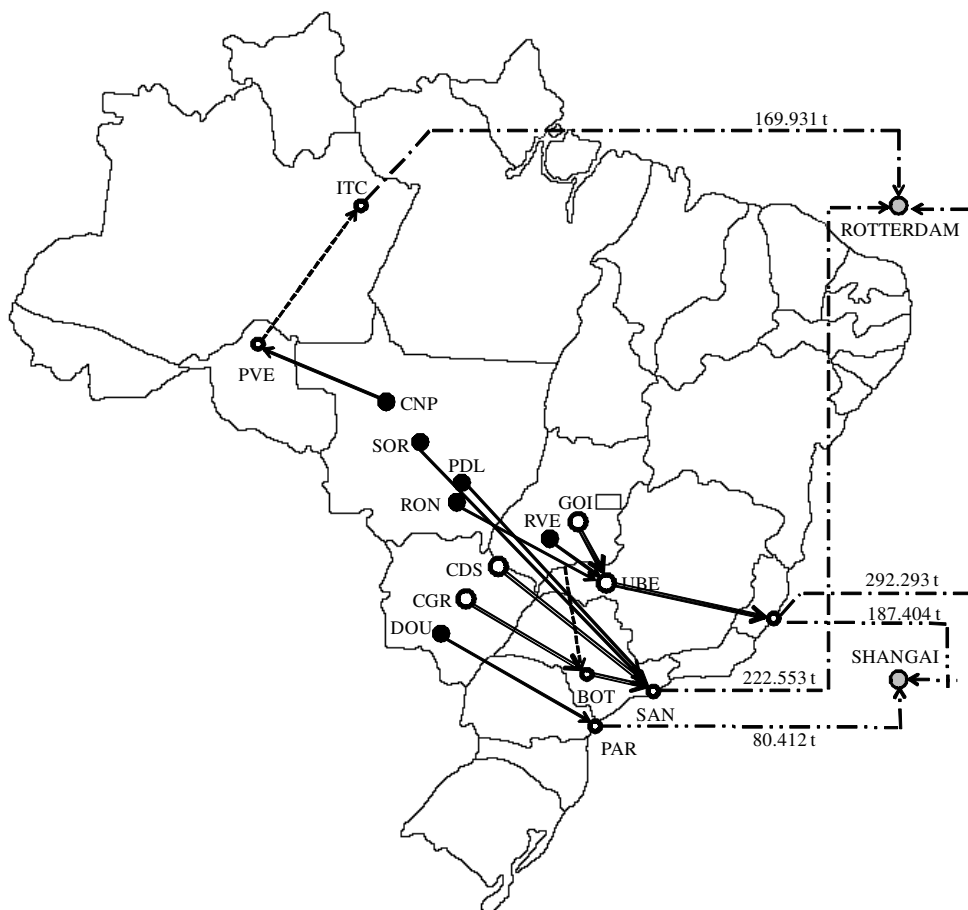


Figura 7 – Fluxos ótimos considerando atraso de 3 dias no embarque da soja no porto de Santos

Observa-se um alívio na demanda pelo embarque em Santos, que passa a absorver apenas 24,77% de toda a soja exportada, proveniente de 4 dos 10 pontos de oferta. Itacoatiara e Paranaguá recebem soja de um único ponto cada: Campo Novo do Parecis e Dourados, enquanto os de Vitória absorvem os outros três: Goiânia, Rio Verde e Uberlândia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A soja, uma das culturas mais importantes do agronegócio brasileiro, é responsável

por grandes volumes de exportações. Porém, muitos desafios se impõem ao aumento da sua competitividade nos mercados internacionais, como os elevados custos de escoamento incorridos desde as plantações até os principais portos e o não cumprimento de prazos de entrega estabelecidos em contratos. Apresentou-se, nesse contexto, um modelo para seleção de rotas intermodais com minimização de custos e do maior tempo de viagem, de forma ponderada. Economias de escala e janelas de tempo para entrega conferem maior grau de realismo ao modelo, que também apresenta restrições de capacidade e conservação de fluxos.

Alguns testes preliminares foram realizados com instâncias geradas a partir de dados obtidos de fontes secundárias. Os resultados mostram que o modelo é capaz de capturar algumas das particularidades do sistema intermodal brasileiro utilizado para a exportação da soja em grão. Os efeitos da consideração do tempo de viagem e da ocorrência de gargalos em alguns portos ilustram algumas decisões que poderiam ser apoiadas pelo modelo, com ações de desvio de alguns fluxos para rotas alternativas. Outras possibilidades, como a aplicação do modelo a uma rede mais realista e a consideração da exportação de múltiplos produtos – com a inclusão do farelo de soja e do açúcar, por exemplo – constituem algumas perspectivas futuras interessantes e que estão em nossa agenda de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio da CAPES, do CNPq, da FAPESP e da FINEP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ABIOVE, Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais.** (2010). *Exportações do complexo da soja*. Disponível em: < http://www.abiove.com.br/exporta_br.html >. Acesso em 5 Abr. 2010.
- [2] **ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres.** (2010). *Transporte Multimodal*. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/faq/multimodal.asp>>. Acesso em 5 Fev. 2010.
- [3] **AMARAL, M.; ALMEIDA, M. S. & MORABITO, R.** (2009). Um modelo de localização de terminais intermodais para exportação de soja no Brasil. *Anais do XII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, Rio de Janeiro – RJ.
- [4] **ARNOLD, P.; PEETERS, D.; THOMAS, I.** (2004). Modeling a rail/road intermodal transportation system. *Transportation Research Part E*, 40, 255-270.
- [5] **BARNHART, C. & RATLIFF, H.** (1993). Modelling intermodal routing. *Journal of Business Logistics*, Vol. 14, p. 205-223.
- [6] **BOARDMAN, B. S.; MALSTROM, E. M.; BUTLER, D. P. & COLE, M. H.** (1997). Computer assisted routing of intermodal shipments. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 33, n. 1-2, p. 311-314.
- [7] **BOOKBINDER, J. H. & FOX, N. S.** (1998). Intermodal routing of Canada – Mexico shipments under NAFTA. *Transportation Research Part E*, Vol. 34, p. 289-303.
- [8] **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. *Revista Teoria e Evidências Econômicas*, Vol. 8, n. 15, p. 11-23.
- [9] **CHANG, T. S.** (2008). Best routes selection in intermodal networks. *Computers and Operations Research*, Vol. 35, p. 2877-2891.
- [10] **DALTO, E. J.** (2003). *Ferramenta de simulação para auxiliar o produtor brasileiro de soja no desenvolvimento de estratégia logística e financeira de comercialização de uma safra do produto a granel*. Tese de Doutorado em Administração. Rio de Janeiro: Instituto COPPEAD de Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 230 p.
- [11] **FOURER, R.; GAY, D. M. & KERNINGHAN, B. W.** (2002). *AMPL: a modeling for mathematical programming*. 2 ed. Duxbury Press: Books-Cole Publishing Company.
- [12] **GEIPOT**, Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, Empresa Brasileira de

Planejamento de Transportes. (2001). *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 2010.

[13] **GOOGLE MAPS**. Disponível em: <www.maps.google.com.br>. Acesso em 12 Jan 2010.

[14] **GROOTHEDE, B.; RUIJGROK, C. & TAVASSZY, L.** (2005). Towards collaborative, intermodal networks – a case study in fast moving consumer goods marketing. *Transportation Research Part E*, Vol. 41, p. 567-583.

[15] **GUIA QUATRO RODAS**. Disponível em: <<http://viajeaquibril.com.br/guia4rodas/>>. Acesso em 12 Jan 2010.

[16] **IBGE**, Instituto Brasileiro de Geociência e Estatística. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em 2 Ago 2009.

[17] **JUNQUEIRA, R. A. R. & MORABITO, R.** (2006). Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho. *Revista Produção*, Vol. 16, n. 3, p. 510-525.

[18] **KUSSANO, M. R. & BATALHA, M. O.** (2009). Custos logísticos de escoamento da soja em grão brasileira para o mercado externo. *Revista Inovação, Gestão e Produção – Ingepro*, Vol. 1, n. 1, p. 27-38.

[19] **MACHARIS, C & BONTEKONING, Y. M.** (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: a review. *European Journal of Operational Research*, Vol. 153, n. 2, p. 400-416.

[20] **MENDES, J. T. G. & PADILHA JÚNIOR, J. B. P.** (2008). Estratégias de comercialização da soja: análise de portfólios, sob condições de risco. *Revista Produção*, Vol. 18, n. 3, p. 441-451.

[21] **MEREGE, A. A. & ASSUMPCÃO, M. R. P.** (2002). Logística para exportação da soja paranaense. *Anais do XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Curitiba – PR.

[22] **MIN, H.** (1991). International intermodal choices via chance-constrained goal programming. *Transportation Research Part A*, Vol. 25, p. 351-362.

[23] **NAVES, I. M.** (2007). *A remoção dos estoques públicos através do corredor Noroeste: uma análise sob a ótica da logística do agronegócio*. Mestrado em Agronegócios. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, 144 p.

[24] **OJIMA, A. L. R. O.** (2006). Perfil da logística de transporte de soja no Brasil. *Revista Informações Econômicas*, Vol. 36, n. 1, p. 17-25.

[25] **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*, Vol. 54, n. 1, p. 33-41.

[26] **OJIMA, A. L. R. O. & YAMAKAMI, A.** (2006). Modelo de programação quadrática para análise da movimentação logística e comercialização da soja brasileira. *Revista Engenharia Agrícola Jaboticabal*, Vol. 26, n. 2, p. 552-560.

[27] **OLIVEIRA, E. P.** (2007). *Modelo conceitual de um sistema de apoio à decisão para gestores de logística e transporte em canais de exportação agrícola*. Doutorado em Engenharia de Produção. Florianópolis: Departamento de Engenharia de Universidade Federal de Santa Catarina, 241 p.

[28] **PARK, J. J.; BABCOCK, M. W. & LEMKE, K.** (1999). The impact of railroad mergers and grain transportation market: a Kansas case study. *Transportation Research Part E*, Vol. 35, p. 269-290.

[29] **PICARD, G & GAUDRY, M.** (1998). Exploration of a box cox logit model of intercity freight mode choice. *Transportation Research Part E*, Vol. 34, p. 1-12.

[30] **SOUTHWORTH, F. & PETERSON, B. E.** (2000). Intermodal and international freight network modeling. *Transportation Research Part C*, Vol. 8, p. 123-141.