

AVALIAÇÃO DOS CUSTOS E EMISSÕES DE CO₂ NO TRANSPORTE DE ETANOL: APLICAÇÃO DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO

José Eduardo Holler Branco

Daniela Bacchi Bartholomeu

Ana Carolina Vettorazzi

Universidade de São Paulo

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o custo mínimo e mensurar as emissões de CO₂ do transporte da produção de etanol do Brasil, por meio da aplicação de um Modelo de Otimização de Fluxos de Transporte Multimodal. Propõe-se também avaliar por meio da modelagem o efeito decorrente da implantação do sistema dutoviário da empresa Logum Logística, que se encontra em construção, na mitigação das emissões de CO₂ e na redução do custo de transporte. Os resultados indicam que a implantação plena dessa malha de dutovias apresenta potencial para reduzir em 14% as emissões totais de CO₂ dos fluxos de transporte de etanol no país e gerar uma economia anual de R\$ 136 milhões nas despesas com frete. O método desenvolvido disponibiliza um ferramental que pode ser usado em outros estudos para fins de avaliação do custo mínimo e das emissões de CO₂ no transporte de cargas.

ABSTRACT

This paper aims evaluate the minimum cost and measure the CO₂ emissions of ethanol transportation in Brazil using a Multi-modal Network Flow Optimization Model. Additionally, the second objective is assessing the impact of the Logum Logística's pipeline network system (under construction) in terms of CO₂ emissions and transportation costs reduction. The results showed that the complete implementation of this pipeline network have a potential to reduce CO₂ emissions by 14% and provide savings around R\$ 136 million per year in the ethanol transportation. The method developed is a practical tool for the evaluation of the minimum cost and CO₂ emissions of freight transportation.

1. INTRODUÇÃO

A produção de etanol no Brasil tem sua importância justificada por abastecer, em larga escala e a preços competitivos, grande parte do volume de combustível demandado pela frota de veículos leves do país. O consumo desse biocombustível no país aumentou cerca de 60,8% nos últimos 10 anos (entre 2007 e 2016), segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2017).

Dentre as vantagens do uso do etanol como combustível, merece destaque o importante papel na mitigação das mudanças climáticas, dado seu caráter renovável e de baixa emissão líquida dos Gases causadores do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera.

Apesar de o etanol da cana-de-açúcar apresentar um balanço líquido de emissões de GEE sensivelmente inferior em relação aos combustíveis fósseis e outros biocombustíveis produzidos a partir de outras matérias-primas, as emissões estão presentes em diversas etapas do seu processo produtivo (Carmo, 2013). Neste contexto, este artigo concentra a análise nas emissões de CO₂ geradas pelo transporte do etanol, das usinas até as bases de distribuição ou portos.

Atualmente, a movimentação do biocombustível é majoritariamente realizada através da modalidade rodoviária, que apresenta uma maior emissão de CO₂ comparativamente às outras modalidades de transporte (Xavier, 2008). No entanto, a partir da consolidação de um projeto recente envolvendo a construção de um sistema dutoviário dedicado para a movimentação de etanol, que ligará importantes regiões produtoras de etanol à Paulínia (SP), principal base de distribuição de combustíveis do país, este cenário pode mudar e contribuir positivamente para

o balanço das emissões de CO₂ no transporte etanol, e ainda proporcionar redução nas despesas com frete (Pinheiro, 2012).

Este artigo tem como principal objetivo desenvolver e aplicar um Modelo de Otimização de Fluxos de Transporte Multimodal para a determinação dos fluxos de etanol através de uma malha viária multimodal, visando atingir a configuração de mínimo custo total de transporte dos volumes de etanol entre as regiões produtoras e as bases de distribuição. A partir dessas informações, o artigo mensura as emissões de CO₂ resultantes das operações de transporte de etanol e avalia o potencial impacto do projeto dutoviário para a mitigação das emissões. Além disso, também avalia o impacto do etanolduto no custo de transporte. A hipótese adotada é a de que a opção dutoviária para escoar o etanol pode contribuir para mitigar as emissões de GEE e, simultaneamente, aumentar a competitividade econômica do biocombustível, decorrente de um menor custo de transporte. Com isso, um custo de transporte mais atrativo do modo dutoviário pode ser um fator importante para atrair maiores volumes embarcados da carga através do sistema dutoviário e consolidar os benefícios ambientais relativos a menores níveis de emissão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O mercado e a logística do etanol no Brasil

A introdução da tecnologia Flex Fuel Vehicle (FFV) nos automóveis em 2003 consolidou o mercado de etanol combustível no Brasil. O perfil da frota de automóveis foi se modificando ano a ano, de modo que em 2017, a produção de carros flex totalizou 1,9 milhões de unidades, o que corresponde a 84,7% da produção total de automóveis no país. Para se ter uma ideia, a produção de veículos movidos a gasolina representou 13,9%, e a diesel apenas 1,4% (ANFAVEA, 2018). Por sua vez, o consumo do biocombustível, aumentou cerca quase 61% nos últimos 10 anos, passando de 16,6 milhões de m³ em 2007, para 26,7 milhões de m³ em 2016 (EPE, 2017).

Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a produção brasileira de álcool a partir da cana-de-açúcar atingiu 30,49 milhões de m³ na safra 2015/2016, sendo que a região Centro-Sul do país foi responsável por 28,47 milhões de m³, cerca de 93% da produção total (BRASIL, 2016), posicionando-se como segundo maior produtor de etanol (UNICA, 2017a).

Dado seu caráter renovável, o uso do etanol como combustível proporciona externalidades positivas para o ambiente. Numerosos estudos evidenciam a maior eficiência deste biocombustível em termos de conversão de energia e emissão de carbono, quando comparado a outros combustíveis e biocombustíveis (Macedo, 2007; Carmo, 2013; Goldemberg et al., 2008).

Considerando os desafios para a mitigação das emissões de GEE, os biocombustíveis, particularmente o etanol de cana-de-açúcar, são apontados como uma alternativa viável para ajudar o Brasil nas metas de redução de emissão junto ao Acordo de Paris. Este acordo foi definido no âmbito da 21ª Conferência das Partes (COP21), realizada em 2015, no qual 195 países se comprometeram a limitar o aumento da temperatura a 1,5°C ou, pelo menos, a 2,0°C, até 2100, em comparação à média do planeta antes da Revolução Industrial.

Neste contexto, foi lançado em dezembro de 2016 o Programa RenovaBio, pelo Ministério de Minas e Energia, apresentando três objetivos principais (BRASIL, 2018): i) contribuir para o cumprimento dos Compromissos Nacionalmente Determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris; ii) expandir a participação dos biocombustíveis na matriz energética,

garantindo a regularidade do abastecimento de combustíveis; iii) assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, através de ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de GEE desde a produção, passando pela comercialização, até o uso final de biocombustíveis.

Para tanto, dois instrumentos estão sendo delineados de forma a permitir que o RenovaBio alcance seus objetivos: (a) estabelecimento, para um período de 10 anos, de metas de redução de emissões para a matriz de combustíveis; e (b) certificação da produção de biocombustíveis indicando a contribuição de cada produtor (em termos de toneladas de CO₂) para a mitigação das emissões de GEE em relação ao seu substituto fóssil, provendo bonificações aos produtores mais eficientes por meio de Créditos de Descarbonização - CBios (BRASIL, 2018).

Neste contexto, a otimização das rotas de distribuição de etanol e o aumento do uso de modalidades de transporte que revelam menor emissão de CO₂ por tonelada quilômetro útil, particularmente o modo dutoviário, tornam-se estratégias importantes para as usinas produtoras de etanol, tendo em vista que podem resultar em uma maior quantidade de CBios a serem liquidadas junto às distribuidoras.

Xavier (2008) descreve quatro tipos de fluxos ao longo da cadeia de abastecimento de etanol:

- i) Fluxos primários: percurso entre os produtores de etanol e as bases de distribuição, podendo ser realizado diretamente pelo modo rodoviário até as bases (predominante nesse tipo de fluxo), ou por meio de terminais coletores que dão acesso às malhas dutoviárias, ferroviárias ou hidroviárias que conectam as bases de distribuição;
- ii) Fluxos de distribuição: compreende a etapa de distribuição dos combustíveis, entre as bases de distribuição e os postos de varejos, realizada por caminhões compartimentados de menor capacidade, que trafegam em regiões urbanas;
- iii) Fluxos de exportação: são os fluxos de etanol entre as usinas e os terminais portuários, que realizam o embarque do produto para o mercado internacional, sendo realizado majoritariamente por meio do modo rodoviário; e
- iv) Fluxos de transferência: corresponde ao transporte de combustível entre as bases de distribuição. Os principais corredores de transferência de combustíveis exibem uma maior disponibilidade de infraestrutura viária, contando com ferrovias, hidrovias e dutovias.

Um modo de transporte que vem ganhando destaque atualmente na logística de etanol é o dutoviário, haja vista que essa alternativa revela um custo bastante competitivo e menor impacto ambiental, considerando a baixíssima emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (Avileis, 2014).

Neste contexto, destaca-se a existência de um sistema dutoviário dedicado exclusivamente para a movimentação de etanol, criado pela empresa Logum Logística S. A. Com suas operações iniciadas em agosto de 2013, o projeto, quando concluído, terá mais de 1.300 quilômetros de dutos que vão atravessar 45 municípios, fazendo a ligação das principais regiões produtoras de etanol nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul com a principal base de distribuição do país, localizada em Paulínia (SP). O projeto é financiado pelo BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e vem sendo liderado por um consórcio de produtores de etanol (LOGUM, 2017).

3. METODOLOGIA

3.1. Dados de oferta e demanda

Os dados de oferta considerados na modelagem correspondem à produção de etanol anidro e hidratado por microrregião registrada no ano de 2016, informada pela União das Indústrias de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2017b).

As informações de demanda são as vendas de etanol no ano de 2016 reportadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2016a). A partir dos volumes de etanol anidro e hidratado vendidos em cada estado brasileiro, estimou-se o volume consumido em cada base de distribuição, rateando as vendas estaduais proporcionalmente à capacidade estática de tancagem das bases de distribuição (ANP, 2016b).

Os volumes de etanol embarcados para exportação em cada porto em 2016 são as estatísticas declaradas pela Secretaria de Comércio Exterior do Governo Federal (SECEX, 2016).

As informações de oferta e demanda foram desagregadas em unidades geográficas denominadas microrregiões, baseadas na divisão espacial do território nacional proposta pelo Instituto Brasileiro de Estatística e Geografia (IBGE).

Para cada microrregião de oferta de etanol, foi selecionada a cidade que apresenta maior produção do biocombustível como centroide. No caso das microrregiões de demanda, adotou-se como centroide a cidade que abriga a base de distribuição com maior capacidade estática de armazenamento ou, a localidade que abriga um porto.

3.2. Malha multimodal de transporte

Considerou-se a malha ferroviária atual como infraestrutura de ferrovias disponível para o transporte de etanol e os terminais de transbordo foram aqueles que embarcaram etanol no ano de 2016. As capacidades de embarque dos terminais foram definidas com base na declaração de rede ferroviária divulgada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2016).

No caso da malha dutoviária, foi considerado o traçado do sistema dutoviário da Logum em operação e os trechos futuros contemplados no projeto de expansão da malha de dutovias (Figura 1).

Os volumes de etanol movimentados em 2016 através do sistema dutoviário da Logum foram tidos como capacidades da malha de dutovias atualmente em operação (LOGUM, 2017).

A Figura 1 apresenta a malha multimodal atual e futura considerada na modelagem e os centroides originadores de carga, que representam as microrregiões de oferta de etanol.

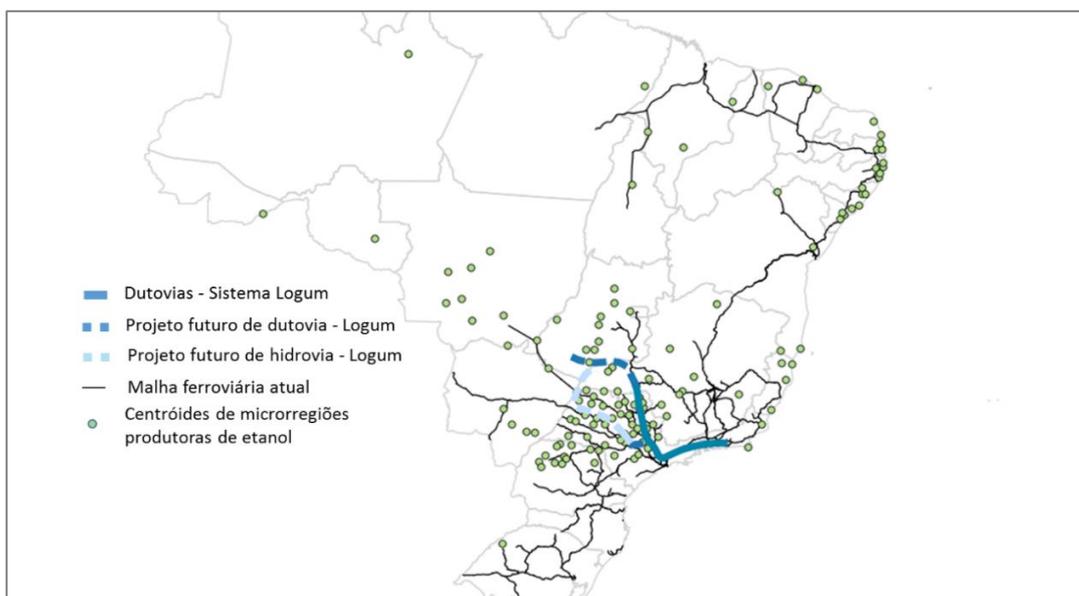


Figura 1: Malha de transporte atual e futura e centroides das regiões produtoras
Fonte: elaborado pelos autores.

Os valores de fretes rodoviários entre as combinações origem-destino foram estimados através de um modelo linear, conforme descrito na Equação 1.

$$F_{ij} = \alpha + \beta \cdot x_{ij} \quad (1)$$

Onde:

F_{ij} : Preços de frete rodoviário entre origem i e destino j (R\$/m³)

x_{ij} : Distância entre origem i e destino j (km)

α : Coeficiente linear da função

β : Coeficiente angular da função

Os parâmetros α e β da função foram calculados pelo método dos mínimos quadrados a partir de valores reais de frete praticados para o transporte de etanol no ano de 2016, fornecidos pelo Sistema de Informação de Fretes (SIFRECA, 2017a). O resultado da regressão e os indicadores da significância do modelo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Equação de frete e significância estatística do modelo de regressão linear

Regressão linear	Etanol
Função Frete	$F_{ij} = 39,52 + 0,11 \cdot x_{ij}$
R-quadrado (R^2)	0,76
Teste F	26,26
F crítico	11,25
Valor-P (β)	0,0043
Valor-P (α)	0,0009

Fonte: resultados do trabalho.

O teste estatístico da regressão apresentou elevado coeficiente de determinação (R^2) e o Valor-P observado permite rejeitar a hipótese nula $\beta = 0$ ou $\alpha = 0$ a um nível de confiança de 99%. Ou seja, a função calculada apresentou uma boa aderência estatística com os valores reais de frete, sendo que, de acordo com o R^2 obtido, 76% da variação dos valores de frete pode ser explicada pela variação da distância.

No caso dos modos ferroviário e hidroviário, foram adotados fretes relativos. Considerou-se que os valores dos fretes ferroviários correspondem a 70% dos fretes rodoviários estimados para uma distância similar, e os valores de fretes hidroviários e dutoviários correspondem a 50% dos valores de frete rodoviários de rotas equivalentes. Esses percentuais de fretes relativos foram calibrados por meio de informações de fretes de mercado dessas modalidades levantadas pelo Sistema de Informações de Fretes - Sifreca (SIFRECA, 2017b).

Os fatores de emissão de CO_2 nos diferentes modos de transporte expressos na Tabela 3 foram calculados considerando uma mistura de 7% de biodiesel ao diesel (B7), conforme regulamentação da Agência Nacional do Petróleo para 2016 e o consumo médio de diesel.

Para o modo rodoviário, considerou-se um consumo médio de 14,81 litros de diesel por metro cúbico transportado em mil quilômetros, tendo como referência dados de consumo de um veículo do tipo Bitrem disponibilizados pelo Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG, 2017).

No caso do modo ferroviário, o consumo médio adotado foi de 5,93 litros de diesel por metro cúbico transportado em mil quilômetros, com base no consumo médio de diesel declarado pelas concessionárias ferroviárias e reportado pela ANTT (2016). Vide Tabela 2.

Tabela 2: Consumo médio de diesel e fatores de emissão dos modos rodo, ferro e hidroviário

	Consumo médio de diesel ($\text{L}/\text{m}^3.\text{km}$)	Emissão de CO_2 (kg) por litro de diesel B7*	Emissão de CO_2 por modo ($\text{kgCO}_2/\text{m}^3.\text{km}$)
Rodoviário	0,0148	2,591	0,0383
Ferrovário	0,0059	2,591	0,0153
Hidroviário	0,0040	2,591	0,0104

* Para o cálculo do fator de emissão do diesel B7 foi considerado o fator de emissão do diesel puro de 2,603 $\text{kg CO}_2/\text{L}$ e do biodiesel puro de 2,431 $\text{kg CO}_2/\text{L}$, conforme BRASIL (2013).
Fonte: elaborado pelos autores.

Para cálculo da emissão de CO_2 do transporte por meio de dutovias considerou-se as emissões decorrentes do consumo da energia elétrica necessária para o funcionamento do sistema dutoviário. Baseou-se no trabalho de Bovolenta e Biaggioni (2016) que estimaram um consumo de energia de $3,89 \times 10^{-5}$ $\text{MWh}/\text{m}^3.\text{km}$ em uma rota dutoviária com extensão de 837 km. A partir do consumo energético e considerando um fator de emissão de CO_2 de 101,3 kgCO_2/MWh de energia elétrica gerada no Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional 2017 divulgado pela Empresa de Planejamento Energético (EPE, 2017), encontrou-se o coeficiente de 0,0039 $\text{kgCO}_2/\text{m}^3.\text{km}$, que representa a emissão de CO_2 do transporte através do modo dutoviário.

3.3. Cenários de análise

Com o objetivo de avaliar o impacto da implantação do projeto dutoviário da Logum nas emissões de CO_2 e no custo de transporte, foram considerados três cenários, sendo eles:

- Cenário A: considera a malha multimodal atual sem a opção dutoviária;

- Cenário B: considera a malha multimodal atual incluindo o trecho do sistema dutoviário da Logum em operação;
- Cenário C: considera a malha multimodal atual incluindo todo o projeto do sistema dutoviário da Logum, ou seja, os trechos futuros da dutovia e a hidrovía Tietê-Paraná.

3.3 Modelo Matemático

Foi desenvolvido um modelo matemático de programação linear que tem como objetivo otimizar os fluxos inter-regionais de etanol entre as regiões produtoras e as bases de distribuição, buscando a minimização do custo total de transporte. Considerou-se como variáveis as quantidades transportadas de etanol anidro e hidratado entre as origens e destinos através da malha multimodal de transporte. Além disso, o modelo foi configurado para fornecer a emissão total de CO₂ gerada pelos fluxos de transporte.

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da rede de transporte considerada na modelagem:

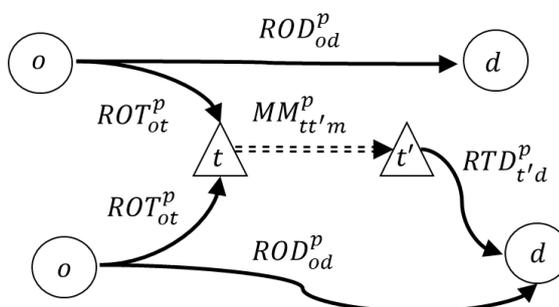


Figura 2: Rede de transporte considerada na modelagem e variáveis de fluxo
 Fonte: elaborado pelos autores.

A Equação 2 define a função objetivo do modelo, que busca minimizar o valor total do custo de transporte de etanol (*FT*).

$$\begin{aligned}
 \text{Min } FT = & \sum_o \sum_d \sum_p (ROD_{od}^p \times FR_{od}) + \\
 & \sum_o \sum_t \sum_p (ROT_{ot}^p \times FOT_{ot}) + \\
 & \sum_t \sum_{t'} \sum_p \sum_m (MM_{tt'm}^p \times FMM_{tt'm}) + \\
 & \sum_{t'} \sum_d \sum_p (RTD_{t'd}^p \times FTD_{t'd})
 \end{aligned} \tag{2}$$

onde:

ROD_{od}^p : Fluxo rodoviário direto entre origem *o* e destino *d*, do tipo de etanol *p*;

ROT_{ot}^p : Fluxo rodoviário entre origem *o* e transbordo *t*, do tipo de etanol *p*;

$MM_{tt'm}^p$: Fluxo intermodal entre transbordo *t* e transbordo *t'*, por meio da modalidade de transporte *m*, do tipo de etanol *p*;

$RTD_{t'd}^p$: Fluxo rodoviário entre transbordo *t'* e destino *d*, do tipo de etanol *p*;

FR_{od} : Valor unitário do frete rodoviário entre origem *o* e destino *d*;

FOT_{ot} : Valor unitário do frete rodoviário entre origem *o* e transbordo *t*;

$FMM_{tt'm}$: Valor unitário do frete intermodal entre transbordo t e transbordo t' , por meio da modalidade de transporte m ;

$FTD_{t'd}$: Valor unitário do frete rodoviário entre transbordo t' e destino d ;

o : Regiões produtoras de etanol (microrregiões);

d : Regiões de consumo do etanol (microrregiões), onde se localizam as bases de distribuição ou os portos de exportação;

p : Tipo de etanol - etanol anidro ou hidratado;

m : Modalidade de transporte intermodal - ferroviária, hidroviária ou dutoviária.

As unidades dos fluxos de transporte são metros cúbicos e os fretes são expressos em R\$ por metro cúbico transportado.

A Equação 3 apresenta a função contábil que fornece o valor total de emissão de CO₂ gerado pelos fluxos de transporte de etanol (EC).

$$\begin{aligned}
 EC = & \sum_o \sum_d \sum_p (ROD_{od}^p \times DIST_{od} \times ECR) + \\
 & \sum_o \sum_t \sum_p (ROT_{ot}^p \times DIST_{ot} \times ECR) + \\
 & \sum_t \sum_{t'} \sum_p \sum_m (MM_{tt'm}^p \times DIST_{tt'} \times ECM_m) + \\
 & \sum_{t'} \sum_d \sum_p (RTD_{t'd}^p \times DIST_{t'd} \times ECR)
 \end{aligned} \tag{3}$$

onde:

$DIST$: distância;

ECR : coeficiente de emissão de CO₂ no modo rodoviário (kg de CO₂/m³.km);

ECM_m : coeficiente de emissão de CO₂ na modalidade de transporte m (kg de CO₂/m³.km).

A restrição de oferta de etanol é definida por meio da equação (Eq.4).

$$\sum_d ROD_{od}^p + \sum_t ROT_{ot}^p = OF_o^p, \forall o \text{ e } p \tag{4}$$

Sendo OF_o^p o parâmetro que determina a quantidade produzida de etanol anidro e hidratado em cada microrregião de oferta.

A restrição da demanda de etanol é apresentada na Equação 5.

$$\sum_o ROD_{od}^p + \sum_{t'} RTD_{t'd}^p = DE_d^p, \forall d \text{ e } p \tag{5}$$

O parâmetro DE_d^p informa à quantidade consumida de cada tipo de etanol em cada microrregião de consumo.

Além das restrições de oferta e demanda foram incorporadas no modelo restrições que garantem a continuidade do fluxo de cargas ao passar pelos terminais de entrada e saída das alternativas intermodais, conforme estabelecido pelas restrições definidas pelas Equações 6 e 7.

$$\sum_o ROT_{ot}^p = \sum_{t'} \sum_m MM_{tt'm}^p, \forall t \text{ e } p \quad (6)$$

$$\sum_t \sum_m MM_{tt'm}^p = \sum_d RTD_{td}^p, \forall t' \text{ e } p \quad (7)$$

A capacidade de embarque em cada terminal de transbordo é limitada por meio da restrição definida em (8).

$$\sum_{t'} \sum_p MM_{tt'm}^p \leq CAP_{tm}, \forall t \text{ e } m \quad (8)$$

No caso do cenário C, que considera a implantação de todo o projeto do sistema dutoviário, não se aplica a capacidade de embarque nos terminais.

Por fim, foi incorporada uma restrição que proíbe o embarque de todo volume de etanol produzido em uma certa região produtora em uma alternativa intermodal, evitando-se assim o efeito conhecido como “tudo ou nada”. O modelo considera que no máximo 80% da oferta de etanol de uma região poderá ser transportada através das ferrovias, hidrovias ou dutovias, conforme estabelecido pela restrição da Equação 9.

$$\sum_t \sum_p ROT_{ot}^p \leq 0,8 \times OF_o^p, \forall o \quad (9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Iniciando a análise dos resultados observados no Cenário B, que considera a situação atual do sistema dutoviário da Logum em operação, ou seja, o trecho entre Uberaba e Paulínia, a Figura 3 apresenta a área de influência da dutovia envolvendo as microrregiões que apresentaram fluxos de transporte de etanol através dos dutos, indicada pela solução que minimiza o custo total de transporte.

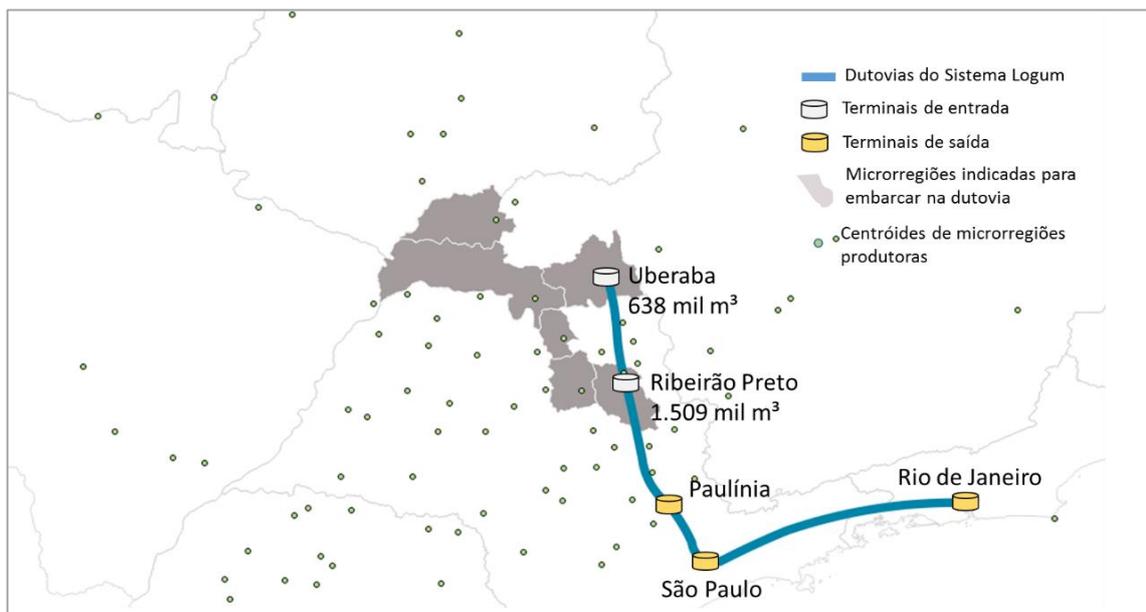


Figura 3: Áreas de influência e volume embarcado no sistema dutoviário no cenário B
Fonte: resultados da pesquisa.

Verifica-se que a solução do modelo indicou a movimentação de um volume total de 2.147 mil m³ através do sistema dutoviário da Logum, considerando o trecho em operação e as capacidades de embarque observadas em 2016.

Comparativamente aos resultados do cenário A, que desconsidera o uso das dutovias, verificou-se que o transporte da produção de etanol sob as condições do cenário B apresentou uma emissão de 20,3 kg de CO₂ por metro cúbico de etanol produzido, valor 6,3% inferior à emissão observada no cenário A (21,6 kg de CO₂/m³).

Esse resultado pode ser interpretado como a contribuição que o sistema dutoviário da Logum atualmente em operação vem proporcionando para a redução das emissões de CO₂ geradas pelo transporte de etanol.

Analisando o custo mínimo de transporte alcançado pela solução do modelo, o cenário B exibiu um custo de transporte médio de R\$ 89,3 / m³ de etanol, valor 2,0% inferior ao custo de R\$ 91,1 / m³ observado no cenário A, o que significa uma economia total de 52 milhões por ano nas despesas com frete decorrente da implantação do sistema dutoviário.

A Figura 4 apresenta a área de influência do sistema dutoviário da Logum indicada pelo modelo de otimização no cenário C, que considera a implantação de toda extensão planejada do sistema dutoviário, incluindo o trecho hidroviário.

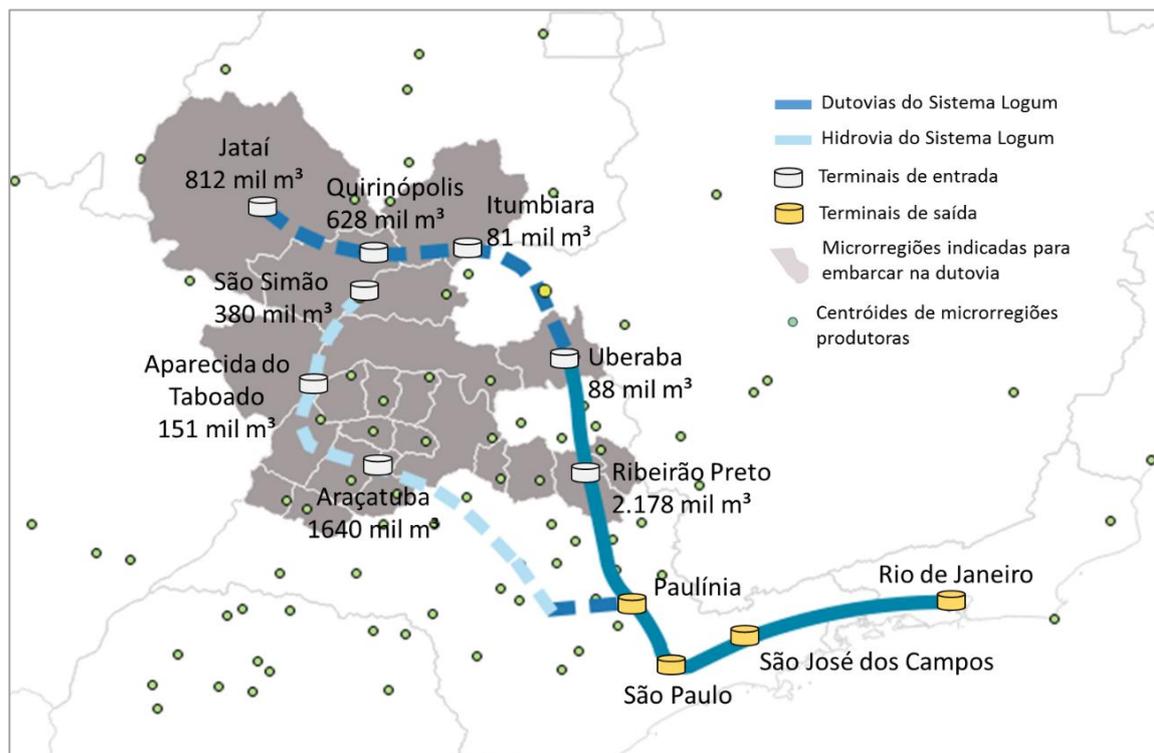


Figura 4: Áreas de influência e volume embarcado no sistema dutoviário no cenário B

Fonte: resultados da pesquisa.

O volume total captado pelo sistema dutoviário nesse cenário foi de 5.958 mil m³ e observou-se uma emissão de 18,5 kg de CO₂ por metro cúbico de etanol produzido, montante aproximadamente 8,7% inferior em relação à emissão do cenário B e 14,4% abaixo da quantidade de CO₂ emitida no cenário A. Essa redução pode ser justificada pelo aumento da participação dos modos dutoviário e hidroviário no transporte total de etanol, conforme resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Participação de cada modal de transporte na movimentação total de etanol e emissões de CO₂ observadas em cada cenário

	Participação % dos modos (m ³ .km)				Emissões de CO ₂	
	Rodovia	Dutovia	Ferrovias	Hidrovia	(toneladas)	Variação % ^(a)
Cenário A	93%	0%	7%	0%	611.404	Referência
Cenário B	86%	7%	7%	0%	573.016	-6,28%
Cenário C	69%	17%	6%	8%	523.430	-14,39%

Nota: (a) A variação percentual foi calculada com base nas emissões do Cenário A.

Fonte: resultados da pesquisa.

A redução na emissão de CO₂ verificada no cenário C em relação ao cenário A é um indicador do potencial de mitigação da emissão de CO₂ que o sistema dutoviário da Logum deve proporcionar quando implementado em sua totalidade.

Os resultados do cenário C indicaram um custo médio de R\$ 86,32 / m³ de etanol transportado, para percorrer uma distância média de 580 km, custo de transporte 3,3% menor do que o custo médio observado no cenário B e 5,3% inferior ao custo encontrado no cenário A.

Verificou-se através dos resultados do cenário C que a operação do sistema dutoviário da Logum em sua totalidade deve gerar uma economia nas despesas com frete por volta de R\$ 136 milhões por ano. A Tabela 4 apresenta o custo de transporte médio de etanol no país obtido em cada cenários e as economias na despesa com frete decorrentes da implantação do sistema dutoviário.

Tabela 4: Custos de transporte médios e economias na despesa com fretes

	Custo de Transporte			Distância Média (km)
	R\$/m ³	Economia milhões R\$/ano	Variação % ^(a)	
Cenário A	91,1	Referência	Referência	569
Cenário B	89,3	52	- 2,0%	574
Cenário C	86,3	136	-5,3%	580

Nota: (a) A variação percentual foi calculada com base nas emissões do Cenário A.

Fonte: resultados da pesquisa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do trabalho demonstraram que a redução nas emissões de CO₂ proporcionada pela utilização do sistema dutoviário da Logum é significativa, sendo esperada uma diminuição de aproximadamente 14% nas emissões das operações de transporte da produção de etanol, caso o projeto seja implementado em sua totalidade, incluindo os trechos dutoviários futuros e o trecho hidroviário. Isso significa dizer que a utilização plena desse sistema de dutovias ao longo de dez anos poderia poupar a emissão de aproximadamente 880 mil toneladas de CO₂, em comparação com o cenário sem a utilização das dutovias.

Cabe ressaltar que esse sistema dutoviário, além do expressivo potencial para mitigar as emissões de GEE, deve assegurar maior competitividade econômica do biocombustível, decorrente de um menor custo de transporte. Os resultados demonstraram que a implantação da rede de dutovias deve resultar em economias no custo de transporte por volta de R\$ 136 milhões por ano, considerando que o custo médio de transporte será reduzido de R\$ 91,13 por metro cúbico, valor encontrado no cenário sem dutovias, para R\$ 86,32 por metro cúbico, conforme resultado do cenário com as dutovias.

A modelagem proposta focalizou nos fluxos de transporte até as bases de distribuição, tendo em vista que o objetivo era avaliar o impacto do sistema dutoviário nos fluxos primários e de transferência. Contudo, para realizar o inventário completo de toda cadeia de distribuição do etanol é necessário mensurar a emissão de CO₂ no transporte entre bases e postos de varejo. Para essa finalidade, é interessante o desenvolvimento de modelos integrados para otimização dos fluxos em todas as etapas da cadeia.

Como estudos futuros, sugere-se que seja avaliado o impacto na emissão de CO₂ de projetos de novas ferrovias que estão em curso, como a Estrada de Ferro Norte-Sul, a Ferrovia de Integração Oeste-Leste e a Ferrogrão, tendo em vista que o aumento da demanda por etanol projetada pelo programa Renovabio tende a aumentar a produção desse biocombustíveis em novas áreas de fronteira agrícola.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) no desenvolvimento do presente trabalho, por meio do Processo Número 2018/24353-3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANFAVEA (2018) *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira*. Obtido de <http://www.anfavea.com.br>.
- ANP (2016a) *Vendas de derivados de petróleo e etanol*. Obtido de <http://www.anp.gov.br>.
- ANP (2016b) *Relação de bases de distribuição de combustíveis líquidos autorizadas a operar*. Obtido de www.anp.gov.br.
- ANTT (2016) *Declaração de Rede*. Obtido de <http://www.antt.gov.br>.
- Avileis, F. G. (2014) *Impactos da logística na precificação do etanol: um estudo de caso sobre a dutovia*. Piracicaba. Obtido de <http://esalqlog.esalq.usp.br>.
- Bovolenta, F. C., e Biaggioni, M. A. M. (2016) Diagnóstico energético de rotas de escoamento do etanol da região centro-oeste do Brasil para exportação. *Engenharia Agrícola*, 36(3), 408–419. doi:10.590/1809-4430.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (2018) *Produção Brasileira de Etanol*. Obtido de <http://www.agricultura.gov.br>.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MME (2013) *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*.
- Carmo, V. B. (2013) *Avaliação da Eficiência Energética Renovável de Biomassas Alternativas para Geração de Eletricidade*. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.
- EPE (2017) *Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016*. Rio de Janeiro. Obtido de <https://ben.epe.gov.br>.
- ESALQ-LOG (2017) *Consumo de combustível no transporte rodoviário*.
- LOGUM (2017) *Sistema Logístico de Etanol*. Obtido de <http://www.logum.com.br>.
- Macedo, I. C. (2007) Situação atual e perspectivas do etanol. *Estudos avançados*, 21(59), 157–165.
- MME (2018) *Programa Renovabio*. Obtido de <http://www.mme.gov.br>.
- Pinheiro, M. A. (2012) *Estimativa da redução das emissões gases de efeito estufa através da intermodalidade no setor sucroenergético: uma aplicação de programação linear*. Universidade de São Paulo, Piracicaba. Obtido de <http://www.teses.usp.br>.
- SECEX (2016) *Aliceweb*. Obtido de <http://alicesweb.mdic.gov.br>.
- SIFRECA (2017a) *Fretes rodoviários de etanol - 2016*.
- SIFRECA (2017b) *Fretes ferroviário e hidroviário para soja*.
- UNICA (2017a) *RenovaBio: Cenários e Simulação de Impacto*. Obtido de <http://www.unica.com.br>.
- UNICA (2017b) *produções de etanol por microrregião no ano de 2016*.
- Xavier, C. E. O. (2008) *Localização de tanques de armazenagem de álcool combustível no Brasil: aplicação de um modelo matemático de otimização*. Universidade de São Paulo, Piracicaba. Obtido de <http://www.teses.usp.br>.