

Avaliação das emissões de CO₂ na etapa de transporte do etanol: aplicação de um modelo de otimização

José Eduardo Holler Branco¹, Daniela Bacchi Bartholomeu², Ana Carolina Vettorazzi³

¹Universidade de São Paulo, jehbranco@usp.br

²Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial, daniela.bartholomeu@usp.br

³Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial, anacvettor@gmail.com

Recebido:

2 de outubro de 2018

Aceito para publicação:

15 de março de 2020

Publicado:

30 de abril de 2020

Editor de área:

Marcio D'Agosto

Palavras-chaves:

Planejamento de transportes,
Logística,
Pesquisa operacional,
Biocombustíveis.

Keywords:

Transport planning,
Logistics,
Operational research,
Biofuels.

DOI:10.14295/transportes.v28i1.1856

RESUMO

Recentemente foi lançado pelo governo brasileiro o programa Renovabio, visando ampliar a participação do etanol na demanda por combustíveis para veículos leves e contribuir para o cumprimento das metas de redução de emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE) firmadas no Acordo de Paris. O sucesso desse projeto pode ser favorecido por um sistema dutoviário que está sendo implantado e deve proporcionar uma alternativa logística de menor custo e com baixíssima emissão de GEE. Tendo em vista esse contexto, esse artigo propõe o desenvolvimento de um modelo de programação linear para otimizar os fluxos de transporte de etanol com o objetivo de mensurar as emissões de CO₂ geradas pelas operações de transporte de etanol, assim como, para avaliar o impacto decorrente da implantação desse projeto dutoviário na mitigação das emissões de CO₂ e na redução do custo de transporte. Os resultados indicam que a implantação plena dessa alternativa logística apresenta potencial para reduzir em 14% as emissões de CO₂ e gerar uma economia de R\$ 136 milhões por ano, no custo de transporte de etanol. O ferramental desenvolvido contribui para avaliar o impacto econômico e a mitigação de GEE causada por novas infraestruturas de transporte.

ABSTRACT

Recently, the Brazilian government launched the Renovabio program, aiming to increase the share of ethanol in the light vehicles fuel demand and help achieve the greenhouse gas emission cutting goals established in the Paris Agreement. The success of this program could be enhanced due to a pipeline network project that is being implemented, for the reason that this infrastructure could provide a lower cost logistic alternative for the ethanol distribution with a very low GHG emission. Considering this context, this paper proposes the development of a linear programming model applied for optimizing ethanol transportation flows and measure accurately the CO₂ emissions resultant of the ethanol transport operations, as well as to evaluate the impact of the implementation of this pipeline network project in mitigating CO₂ emissions and reducing transport costs. The results showed that the full implementation of this pipeline has the potential to reduce CO₂ emissions by 14% and achieve savings around R\$ 136 million per year in the transportation costs of ethanol production. The method proposed in this work contributes for the evaluation of the economic impact and the mitigation of GHG caused by new transport infrastructures.



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 do biocombustível, derivado da cana-de-açúcar, 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.

Reconhecendo o potencial deste e de outros biocombustíveis, tanto para a segurança energética, quanto para mitigação das emissões de GEE, foi lançado, em dezembro de 2016, o programa RenovaBio. Em linhas gerais, o programa é calcado em dois instrumentos que, juntos, permitirão que os biocombustíveis consolidem suas contribuições para o cumprimento dos Compromissos Nacionalmente Determinados pelo Brasil, no âmbito do Acordo de Paris, são eles: (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 para a mitigação das emissões de GEE em relação ao seu substituto fóssil (em termos de toneladas de CO₂) (BRASIL, 2018).

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. 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, a qual apresenta uma maior emissão de GEE comparativamente às outras modalidades de transporte. No entanto, a partir da consolidação de um projeto recente envolvendo a construção de um sistema dutoviário para a movimentação do biocombustível (etanolduto), que ligará por meio de dutovias e hidrovias, 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 GEE do etanol.

Este artigo tem como principal objetivo desenvolver e aplicar um modelo de programação linear para a otimização dos fluxos de etanol através de uma malha viária multimodal, visando estimar os volumes que devem ser transportados entre as regiões produtoras e as bases de distribuição, além da participação de cada modo de transporte na movimentação total do biocombustível. 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. Fundamentação teórica

2.1. O etanol e sua contribuição para redução das emissões de GEE

A introdução da tecnologia *Flex Fuel Vehicle* (FFV) nos automóveis, a partir do ano de 2003, consolidou o mercado de etanol combustível a partir da cana-de-açúcar 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 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).

Como consequência, o Brasil vive uma nova expansão da produção de etanol, tanto de primeira geração, feito a partir dos açúcares extraíveis da cana-de-açúcar, quanto de segunda geração, feito com os excedentes dos processos de produção, como o bagaço e o palhico da cana (NOVACANA, 2017).

O Brasil é, atualmente, o segundo maior produtor de etanol, atrás apenas dos Estados Unidos, que utiliza o milho como matéria-prima (UNICA, 2017).

Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil, 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, ou cerca de 93% da produção total (BRASIL, 2016).

O etanol de segunda geração tem a capacidade de aumentar ainda mais a produção e a produtividade do setor sucroalcooleiro, uma vez que não precisa de novas áreas de canaviais para a sua produção e a palha é uma das biomassas com maior potencial para geração de etanol (Brassolatti *et al.*, 2017).

Dado seu caráter renovável, o etanol apresenta algumas contribuições importantes para o ambiente. De um modo bem genérico, os estudos realizados na área sugerem uma maior eficiência deste biocombustível em termos de conversão de energia e emissão de carbono, quando comparado a outros combustíveis fósseis e biocombustíveis.

O indicador do grau de renovabilidade do biocombustível é dado pela relação entre a quantidade de energia renovável do biocombustível e a energia fóssil utilizada em todo o seu processo de produção. A Tabela 1 evidencia a vantagem do etanol de cana-de-açúcar, frente a diferentes tipos de matérias-primas, em diferentes regiões produtoras (Macedo, 2006 apud Macedo, 2007; e BNDES, 2008; Goldemberg *et al.*, 2008b apud Carmo, 2013).

Tabela 1 – Balanço de energia na produção de etanol, a partir de diferentes matérias-primas

Matéria-prima	Razão entre energia renovável e energia fóssil
Cana-de-açúcar	8,9 - 9,3
Milho	0,6 - 2,0
Beterraba	1,2 - 2,0
Trigo	1,0 - 2,0
Mandioca	1,0 - 1,7
Sorgo sacarino	4,0
Resíduos lignocelulósicos	8,3 - 8,4

No caso das contribuições para a mitigação das emissões de GEE, os biocombustíveis e, em particular, o etanol, 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.

Pelo Acordo de Paris, foi estabelecida a Contribuição Nacionalmente Determinada (iNDC), contendo os principais compromissos e contribuições voluntários assumidos por cada país signatário. Neste cenário, o Brasil definiu que suas metas de redução de GEE seriam de 37% até

2025, e de 43% até 2030, considerando o ano-base de 2005. Apesar da iNDC não ser obrigatória, o Acordo de Paris também determinou a exigência da transparência do monitoramento das emissões, do dinheiro investido e das ações realizadas para evitar o aquecimento global.

Para atingir estas metas, entre outras medidas, o governo brasileiro pretende garantir 45% de fontes renováveis na matriz energética. Neste contexto, é lançado o Programa RenovaBio, em dezembro de 2016 pelo Ministério de Minas e Energia, que apresenta três objetivos principais (BRASIL, 2018):

- a) contribuir para o cumprimento dos Compromissos Nacionalmente Determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris;
- b) expandir a participação dos biocombustíveis na matriz energética, garantindo a regularidade do abastecimento de combustíveis; e
- c) 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 e até o uso final de biocombustíveis.

Para tanto, dois instrumentos estão sendo delineados para que, juntos, permitam 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 para a mitigação das emissões de GEE em relação ao seu substituto fóssil (em termos de toneladas de CO₂) (BRASIL, 2018).

Estes dois instrumentos são a base para o modelo econômico que está sendo delineado para que o RenovaBio funcione. A partir da definição das metas de redução de emissão (chamadas de “metas de descarbonização”), cria-se um mercado para negociação dos Créditos de Descarbonização (CBios), que é o instrumento financeiro para comprovação da meta. Em suma, no caso do etanol, os créditos serão emitidos pelas usinas, a partir de notas de eficiência ao longo do processo de produção e distribuição do biocombustível. Já distribuidoras serão obrigadas a comprá-los para atingirem as metas de descarbonização estabelecidas.

Neste contexto, a possibilidade de transportar o etanol por dutovia configura uma opção muito interessante para as usinas, pois pode representar maior quantidade de CBios a serem comercializados junto às distribuidoras.

2.2. Logística do etanol

Para uma melhor compreensão da logística do etanol é importante fazer uma caracterização da cadeia de distribuição desse biocombustível no país. Com essa finalidade, a Figura 1 apresenta a configuração e principais fluxos de etanol na rede de abastecimento de combustíveis.

Os fluxos de etanol anidro (EA) e etanol hidratado (EH) que partem das usinas com destino ao consumidor final (postos de varejo) devem passar inicialmente pelas bases de distribuição. A legislação que regulamenta a comercialização de combustíveis no país determina que apenas as distribuidoras de combustíveis devidamente autorizadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) podem realizar a venda e entrega de etanol para os postos de varejo.

No caso do etanol anidro (EA), este é misturado com a gasolina A (GA) nas bases de distribuição, resultando em uma mistura denominada gasolina C (GC), cuja composição em 2017 foi de aproximadamente 73% gasolina A e 23% de etanol anidro. Essa proporção pode variar por determinação da ANP, em função dos preços dos combustíveis praticados no mercado.

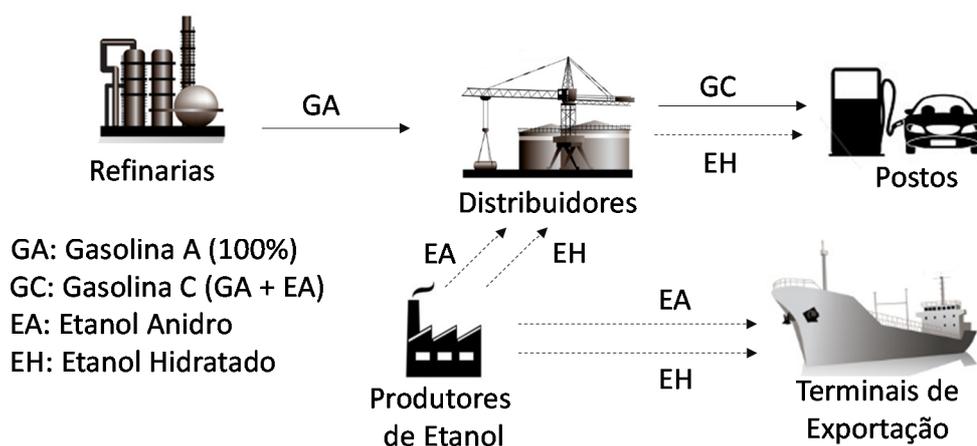


Figura 1. Cadeia de distribuição de álcool e gasolina no Brasil

Conforme descrito por Xavier (2008), são observados quatro tipos de fluxos ao longo da cadeia de abastecimento de etanol:

- a) *Fluxos primários*: correspondem ao percurso entre os produtores de etanol e as bases de distribuição. Em geral, os fluxos primários podem ser transportados:
 - a.1) diretamente para as bases de distribuição através de rodovias (atualmente a modalidade de transporte predominante nesse tipo de movimentação). Esse fluxo, permite o uso de veículos de maior capacidade, como o Bitrem (45 m³) e o Rodotrem (60 m³), pois não requer a operação de descarga nos postos de combustíveis, que muitas vezes limita o tamanho do veículo; ou
 - a.2) inicialmente para um terminal de transbordo (centro coletor), que realiza a transferência da carga para outra modalidade de transporte, como a hidroviária, ferroviária ou dutoviária, sendo posteriormente transportados até a base de distribuição, resultando assim uma em alternativa intermodal;
- b) *Fluxos de distribuição*: compreende a etapa de distribuição dos combustíveis, entre as bases de distribuição e os postos de varejo. Esta etapa, normalmente, é realizada com caminhões compartimentados de menor capacidade, que transportam mais de um tipo de combustível em uma única viagem e proporcionam maior acessibilidade aos postos localizados nos grandes centros urbanos;
- c) *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. Da mesma forma que os fluxos primários, as operações de exportação usam majoritariamente o modo rodoviário; e
- d) *Fluxos de transferência*: corresponde ao transporte de combustível entre as bases de distribuição. Os principais corredores de transferência de combustíveis exibem uma infraestrutura de transporte mais desenvolvida, contando com uma maior disponibilidade de ferrovias, hidrovias e dutovias.

Como os produtores de etanol, em grande parte, estão localizados próximos aos principais centros consumidores, a maior competitividade dos caminhões nas rotas de menor distância e o embarque de lotes pequenos nas usinas justificam a elevada participação do modo rodoviário no transporte de etanol, seja com destino às bases de distribuição ou aos portos exportadores (Milanez *et al.*, 2010). Somado a isso, tem-se a baixa densidade da malha ferroviária brasileira,

a falta de vagões tanques, a baixa velocidade e os gargalos operacionais deste modo fazem com que as ferrovias sejam pouco utilizadas para o transporte de etanol (Costa, 2013).

Em relação aos embarques de exportação de etanol, destaca-se a participação do porto de Santos no volume total exportado. Conforme dados da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX, 2016), na Safra 2015/2016 este porto embarcou aproximadamente 90% do volume de etanol exportado. Na sequência, o porto de Paranaguá embarcou cerca de 7% do volume de etanol exportado.

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, devido a baixíssima emissão de GEE na atmosfera (Aveileis, 2014).

Rodrigues (2007) avaliando as alternativas de transporte rodoviária, dutoviária e hidroviária de etanol com destino à exportação, constatou que vinte e uma das trinta áreas produtoras de etanol consideradas sofreram redução dos custos de transporte com a inserção do modo dutoviário. O autor concluiu que o planejamento das dutovias deve ser realizado pelo conjunto entre o setor privado e o público para que possa ser alcançada a máxima eficiência do transporte.

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, 2017a). A Figura 2 apresenta o traçado da malha dutoviária do sistema Logum em operação.



Figura 2. Sistema dutoviário da Logum em operação. Fonte: LOGUM (2017b)

Vaz *et al.* (2005) citam como principais vantagens desse modo de transporte a baixa demanda por mão-de-obra, o conseqüente baixo custo operacional, a inexistência de problema com viagem de retorno e a operação ininterrupta, com parada somente para manutenção. Já como desvantagens podem ser citadas a falta de flexibilidade em relação à distribuição, uma vez que são estruturas fixas, e também o elevado custo fixo, refletindo a necessidade de um grande aporte de capital para o investimento inicial.

2.3. Modelos matemáticos de otimização de fluxos de transporte

Um estudo realizado pela *Actions de Préparation D'accompagnement et du Suivi – APAS* (1996) destaca a importância dos modelos estratégicos de previsão e otimização dos fluxos inter-regionais de transporte, justificando que são instrumentos indispensáveis para o planejamento do sistema de transporte de uma economia, uma vez que permitem avaliar o impacto econômico causado por alterações da configuração e capacidades da malha viária, ou por variações nos preços de transporte e ainda favorecem os estudos a respeito dos impactos ambientais e consumo energético dos sistemas de transporte.

Segundo Friesz *et al.* (1983), o desenvolvimento de modelos de previsão de movimentação inter-regional de cargas através de uma rede multimodal de transporte é de grande valia para a elaboração de políticas públicas de transporte, para priorização de investimentos na infraestrutura e para o planejamento estratégico de empresas privadas.

Na visão de Garrido e Mahmassani (2000) o sistema de transporte de cargas é um componente-chave de uma economia e, conseqüentemente, está em constante mudança devido às variações do ambiente econômico, o que realça o papel dos modelos de previsão e simulação de fluxos de carga como ferramentas para a otimização das operações de transporte.

Algumas aplicações de modelagem matemática para otimização de sistemas logísticos do setor sucroenergético foram desenvolvidas por Silva *et al.* (2013), Branco *et al.* (2019), Xavier (2008) e Pinheiro (2012).

Silva *et al.* (2013) apresentaram um modelo de transporte desenvolvido para a minimização dos custos dos fluxos logísticos de etanol anidro e hidratado no país. Para tanto, foram considerados cinco cenários com diferentes graus de uso dos modos hidroviário e dutoviário na região Centro-Sul do país. A partir dos resultados, os autores verificaram uma redução de até 30% do custo de transporte de etanol hidratado e de até 14% de etanol anidro, em virtude da introdução desses modos alternativos na malha de transporte.

Utilizando programação inteira mista, Branco *et al.* (2019) propõe um modelo matemático de otimização com o objetivo de analisar qual seria a melhor distribuição espacial da produção de cana-de-açúcar, considerando o mercado sucroenergético de 2030, a fim de minimizar o custo de transporte de açúcar e etanol, e também ampliar a receita do setor. Em relação aos fluxos de transporte de etanol, o resultado do modelo alocou 61% dos fluxos de transporte para o modo rodoviário, 27% para o ferroviário e 12% para o dutoviário. Além disso, os resultados indicaram que o aumento da participação das ferrovias e dutovias no transporte de etanol reduziria expressivamente o valor do frete.

Essa classe de modelo também foi aplicada por Xavier (2008) com o objetivo de determinar locais estratégicos para a instalação de tanques de etanol anidro e hidratado, considerando o ano safra de 2006/2007. Com esse objetivo, foram analisados dois diferentes cenários, o atual, sem a criação de novos tanques, e o futuro, a fim de avaliar o potencial de cada localização para a construção de novos tanques. O autor concluiu que grande parte das localidades indicadas pelo modelo de otimização estão localizadas região Centro-Sul do país, o que pode ser justificado pela grande concentração da demanda nos mercados dessa região.

Pinheiro (2012) teve como objetivo estimar o impacto da utilização da intermodalidade nas emissões de CO₂ das operações de transporte do setor sucroenergético, com uso de um modelo de programação linear. No caso do etanol, os resultados demonstram que a implantação dos

projetos previstos para modos alternativos de transporte, como os projetos ferroviários, hidroviários e dutoviários incluídos no Plano de Aceleração de Crescimento (PAC) ocasionariam, em menos de três anos, a redução de 5,5 milhões de toneladas de CO₂ e de 2,2 bilhões de reais. A autora também argumentou que a melhora na infraestrutura de transporte, em conjunto com incentivos ao uso de modos alternativos, são essenciais para que ocorram ganhos tanto ambientais quanto econômicos na logística de distribuição de etanol.

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, 2017).

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 (Figura 2) e os trechos futuros contemplados no projeto de expansão da malha de dutovias (Figura 3).

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

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

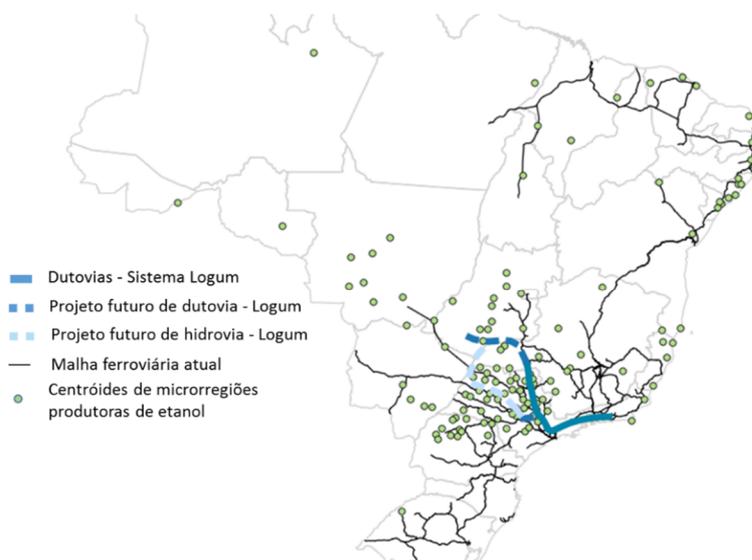


Figura 3. Sistema dutoviário da Logum em operação. Fonte: LOGUM (2017b).

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, 2017). O resultado da regressão e os indicadores da significância do modelo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – 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

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 da malha multimodal, 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.

Os fatores de emissão de CO₂ 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 verificado em cada modalidade.

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 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).

O consumo médio do modo hidroviário considerado foi de 4,00 litros de diesel por metro cúbico transportado em mil quilômetros, conforme reportado por DEPARTAMENTO HIDROVIÁRIO (2009).

A Tabela 3 apresenta os fatores de emissão calculados para esses modos de transporte, a partir do consumo médio de diesel.

Tabela 3 – Consumo médio de diesel e fatores de emissão para os modos rodoviário, ferroviário e hidroviário

	Consumo médio de diesel (l/m ³ .km)	Emissão de CO ₂ (kg) por litro de diesel B7 ¹	Emissão de CO ₂ por modo (kgCO ₂ /m ³ .km)
Rodoviário	0,0148	2,591	0,0383
Ferrovário	0,0059	2,591	0,0153
Hidroviário	0,0040	2,591	0,0104

¹Para o cálculo do fator de emissão do diesel B7 foi considerado o fator de emissão do diesel puro de 2,603 kg CO₂/litro e do biodiesel puro de 2,431 kg CO₂/litro (BRASIL, 2013).

Apesar de o transporte através de dutovias não resultar em consumo direto de combustível, sua operação se dá basicamente pelo consumo de energia elétrica do sistema de bombeamento. Portanto, foi considerado, inicialmente, um cálculo contabilizando as emissões decorrentes do consumo da energia elétrica necessária para o funcionamento do sistema de dutovias. Neste caso, o cálculo da emissão foi baseado no trabalho de Bovolenta e Biaggioni (2016) que estimaram um consumo de energia de $3,89 \times 10^{-5}$ MWh/m³.km em uma rota dutoviária com extensão de 837 km. A partir do consumo energético e considerando um fator de emissão de CO₂ de 101,3 kgCO₂/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 kgCO₂/m³.km, que representa a emissão de CO₂ do transporte através do modo dutoviário.

Alternativamente, é também apresentado um cálculo desconsiderando tais emissões, contabilizando apenas as emissões decorrentes do uso final da energia (queima de combustível), e não decorrentes de sua geração (como no caso da energia elétrica utilizada para o bombeamento). Portanto, neste caso, o trabalho também analisa e apresenta as emissões do transporte de etanol no país considerando-se nula a emissão de CO₂ nas dutovias.

3.3. Cenários de análise

Com o objetivo de avaliar o impacto da implantação do projeto dutoviário da Logum nas emissões de CO₂ 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.

3.4. 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 estruturado para fornecer a emissão total de CO₂ gerada pelos fluxos de transporte.

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática da rede de transporte considerada na modelagem:

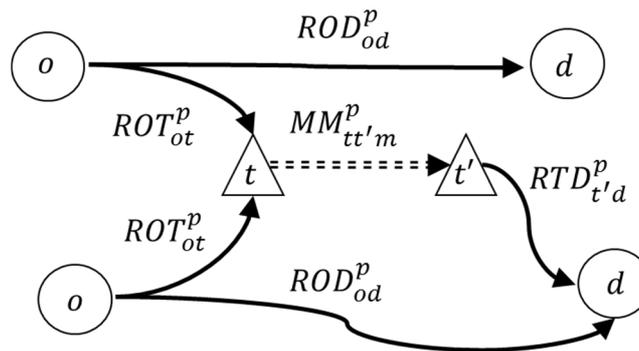


Figura 4. Rede de transporte considerada na modelagem e variáveis de fluxo.

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 (km);
 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 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 (Equação 6) e (Equação 7).

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

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

A capacidade de embarque em cada terminal de transbordo é limitada por meio da restrição (Equação 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 (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 5 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.

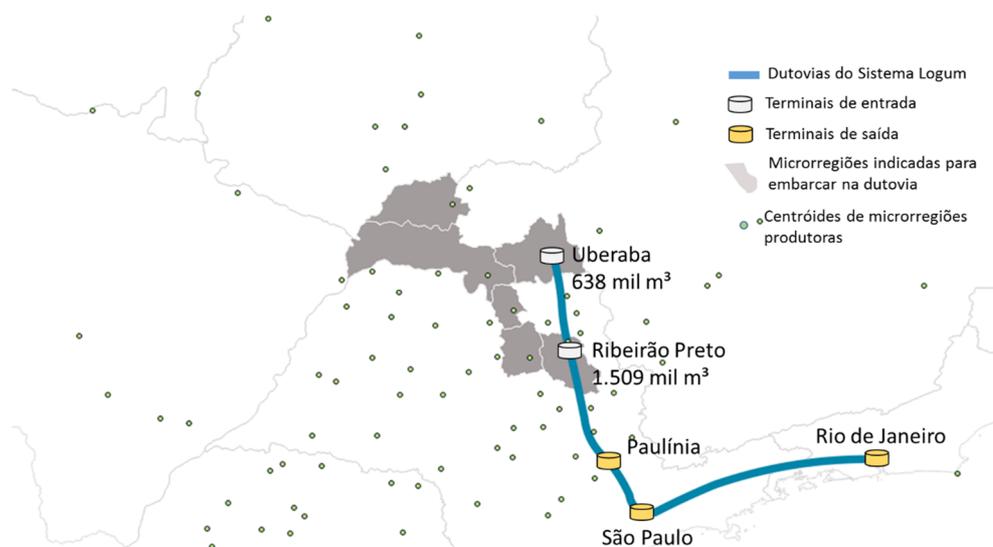


Figura 5. Área de influência e volumes embarcados no sistema dutoviário da Logum (Cenário B).

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.

As microrregiões que apresentaram potencial de embarque na dutovia no cenário B estão listadas na Tabela 4.

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). Quando considerada nula a emissão de CO₂ decorrente da energia elétrica usada para bombeamento do sistema dutoviário, verifica-se uma emissão de 20,1 kg de CO₂/m³ no cenário B, ou seja, 7,1% inferior em relação ao cenário A.

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.

Tabela 4 – Microrregiões que apresentaram fluxos de transporte através do sistema dutoviário da Logum (Cenário B)

Microrregião (UF)	Participação no volume total da dutovia
Ribeirão Preto (SP)	56%
Jaboticabal (SP)	14%
Uberaba (MG)	11%
Frutal (MG)	7%
Barretos (SP)	7%
Ituiutaba (MG)	5%

Analisando o custo mínimo de transporte alcançado pela solução do modelo, o cenário B exibiu um custo de transporte médio de R\$ 89,29 / m³ de etanol, valor 2,00% inferior ao custo de R\$ 91,13 / 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 distância média dos fluxos de transporte de etanol no cenário A foi de 569 km enquanto que no caso do cenário B a distância média de transporte foi de 574 km.

A Figura 6 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 hidrovial.

As microrregiões que apresentaram fluxos de transporte através da dutovia são apresentadas na Tabela 5.

O volume total captado pelo sistema dutoviário nesse cenário foi de 5.958 mil m³ e observou-se uma emissão de 18,5 kg 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 hidrovial no transporte total de etanol, conforme resultados apresentados na Tabela 6. Caso fosse considerada emissão nula das dutovias, a emissão do cenário C cairia para 18,1 kg CO₂ por metro cúbico de etanol produzido, ou seja, 16,3% inferior à emissão observada no cenário A.

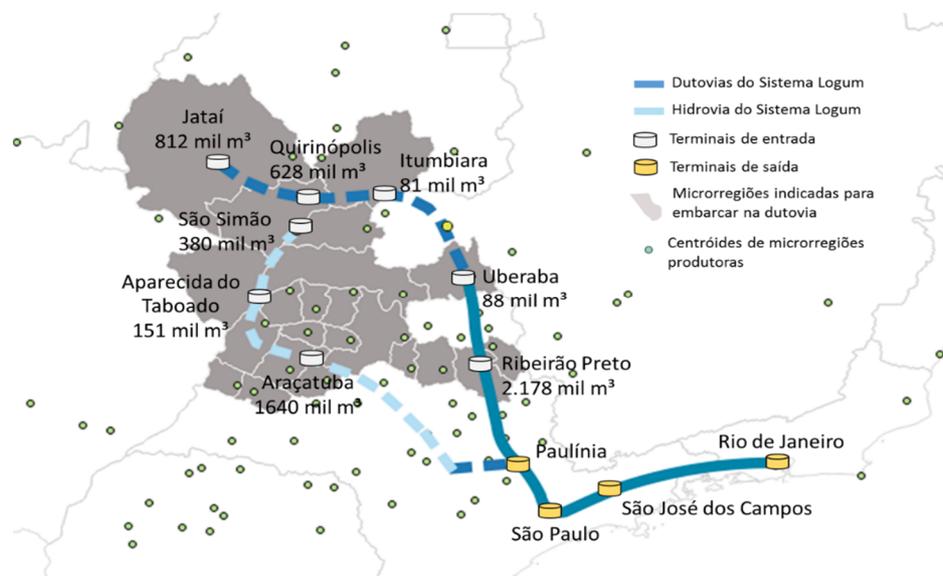


Figura 6. Área de influência e volumes embarcados no sistema dutoviário da Logum (Cenário C)

Tabela 5 – Microrregiões que apresentaram fluxos de transporte através do sistema dutoviário da Logum (Cenário C)

Microrregião (UF)	Participação no volume total da dutovia
Ribeirão Preto (SP)	20%
Sudoeste de Goiás (GO)	11%
Quirinópolis (GO)	11%
Jaboticabal (SP)	8%
Andradina (SP)	7%
Araçatuba (SP)	6%
São José do Rio Preto (SP)	5%
Frutal (MG)	5%
Nhandeara (SP)	4%
Birigui (SP)	3%
Dracena (SP)	3%
Tangará da Serra (MT)	2%
Fernandópolis (SP)	2%
Ituiutaba (MG)	2%
Uberaba (MG)	1%
Batatais (SP)	1%
Catanduva (SP)	1%
Meia Ponte (GO)	1%
Jales (SP)	1%
Paranaíba (MS)	1%
Auriflama (SP)	1%
Adamantina (SP)	1%

O volume total captado pelo sistema dutoviário nesse cenário foi de 5.958 mil m³ e observou-se uma emissão de 18,5 kg 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 hidrovviário no transporte total de etanol, conforme resultados apresentados na Tabela 6. Caso fosse considerada emissão nula das dutovias, a emissão do cenário C cairia para 18,1 kg CO₂ por metro cúbico de etanol produzido, ou seja, 16,3% inferior à emissão observada no cenário A.

Tabela 6 – 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	Ferrovía	Hidrovia	(toneladas)	Varição % ^(a)
Cenário A	100%	0%	0%	0%	611.404	Referência
Cenário B	80%	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.

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 7 sintetiza os principais benefícios econômicos decorrentes da implantação do sistema dutoviário.

Tabela 7 – Redução nas despesas com frete na movimentação total de etanol observada em cada cenário

	Despesas com frete			Distância Média (km)
	R\$/m ³	Economia milhões R\$/ano	Varição % ^(a)	
Cenário A	91,13	Referência	Referência	569
Cenário B	89,29	52	- 2,0%	574
Cenário C	86,32	136	-5,3%	580

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.

Esse resultado corrobora o método de remuneração de Créditos de Descarbonização (CBios) proposto pelo Programa Renovabio, já que a possibilidade de transportar o etanol por dutovia permitirá ao produtor receber maior quantidade de CBios decorrente da menor emissão de CO₂ observada.

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.

O modelo matemático de otimização dos fluxos de transporte revelou-se uma ferramenta importante para estimar as emissões de CO₂ geradas pelo transporte de etanol das usinas até as bases de distribuição, uma vez que é necessário conhecer os fluxos de etanol entre cada região produtora e as regiões de consumo, além da participação de cada modo nessa movimentação, para realizar um inventário preciso das emissões de CO₂ das operações de transporte desse biocombustível.

Os resultados indicaram os ganhos econômicos decorrentes da implantação do sistema dutoviário, gerados pela redução do valor médio do frete. É importante frisar que essa informação proporciona subsídios para a análise de viabilidade financeira dos investimentos na rede dutoviária, contudo, não foi considerado esse tipo de avaliação no escopo deste trabalho. Andriolli (2009) realizou um estudo voltado para avaliação econômico-financeira dos principais projetos de dutovias sugeridos pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA).

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.

REFERÊNCIAS

- Andriolli, M. (2009) Análise de viabilidade econômico-financeira de alcoodutos no Brasil. Universidade de São Paulo, Piracicaba. Obtido de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11132/tde-14042009-160143/>.
- ANFAVEA. (2018) Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. Obtido de <http://www.anfavea.com.br/anuarios.html>.
- ANP. (2016a) Vendas de derivados de petróleo e etanol. Obtido de <http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>.
- ANP. (2016b) Relação de bases de distribuição de combustíveis líquidos autorizadas a operar. Obtido 2 de abril de 2017, de www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=35226.
- ANTT. (2016) Declaração de Rede. Obtido 20 de junho de 2017, de http://www.antt.gov.br/ferrovias/Declaracao_de_Nete_Geral.html.
- APAS. (1996) Transport Strategic Modelling. Luxemburgo.
- 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.
- Branco, J. E. H., Branco, D. H., Aguiar, E. M. de, Caixeta Filho, J. V., e Rodrigues, L. (2019) Study of optimal locations for new sugarcane mills in Brazil: Application of a MINLP network equilibrium model. Biomass and Bioenergy, 127, 105249. DOI:10.1016/j.biombioe.2019.05.018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. (2013) Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, P. e A. S. de P. e A. D. de C. e A. (2016) Produção Brasileira de Etanol. Obtido 11 de fevereiro de 2018, de <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivosproducao/PRODUOBRASILEIRADEETANOLatualizadoem19062018.pdf>.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. (2018) Programa Renovabio. Obtido 21 de junho de 2018, de <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/programas/renovabio/principal>.
- Brassolatti, T. F. Z., Hespanho, A. P., Costa, M. A. B., e Brassolatti, M. (2017) Etanol de Primeira e Segunda Geração. Revista Interdisciplinar de Tecnologias e Educação, 2(1), 1–9.
- Costa, W. R. (2013) Capacidade estática para etanol dos Portos Brasileiros: Santos e Paranaguá. Piracicaba.

- DEPARTAMENTO HIDROVIÁRIO. (2009) "Hidroanel Metropolitano & Dinamização da Hidrovia Tietê - Paraná". São Paulo.
- 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) Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016. Rio de Janeiro. Obtido de https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf
- ESALQ-LOG. (2017) Consumo de combustível no transporte rodoviário.
- Friesz, T. L., Tobin, R. L., e Harker, P. T. (1983) Predictive intercity freight network models: the state of the art. *Transportation Research Part A: General*, 17(6), 409–417. DOI:10.1016/0191-2607(83)90161-9.
- Garrido, R. A., e Mahmassani, H. S. (2000) Forecasting freight transportation demand with the space-time multinomial probit model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 34(5), 403–418. DOI: 10.1016/S0191-2615(99)00032-6.
- LOGUM. (2017a) Quem somos. Obtido de <http://www.logum.com.br/php/quem-somos.php>.
- LOGUM. (2017b) Sistema Logístico de Etanol. Obtido 15 de junho de 2017, de <http://www.logum.com.br/php/o-sistema-logum.php>.
- Macedo, I. C. (2007) Situação atual e perspectivas do etanol. *Estudos avançados*, 21(59), 157–165.
- Milanez, A. Y., Nyko, D., Garcia, J. L. F., e Xavier, C. E. O. (2010) Logística para o etanol: situação atual e desafios futuros. *BNDES Setorial*, 31, 49–98.
- MME - Ministério de Minas e Energia. (2018) Programa Renovabio. Obtido 21 de junho de 2017, de <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis-renovaveis/programas/renovabio/principal>.
- NOVACANA. (2017) Etanol (Álcool): tudo sobre esse biocombustível. Obtido 21 de junho de 2017, de <https://www.novacana.com/etanol/>.
- 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/teses/disponiveis/11/11132/tde-31052012-085545/>.
- Rodrigues, S. B. M. (2007) Avaliação das alternativas de transporte de etanol para exportação na região Centro-Sul. Universidade de São Paulo, São Carlos. Obtido de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-07042008-114034/>.
- SECEX. (2016) Aliceweb. Obtido de <http://alicesweb.mdic.gov.br/>.
- SIFRECA. (2017) Fretes rodoviários de etanol - 2016.
- Silva, R. F. da, Péra, T. G., Bacchi, D. B., Caixeta-Filho, J. V., e Cugnasca, C. E. (2013) Modelo matemático de transporte para avaliação dos ganhos econômicos no transporte hidroviário e dutoviário de etanol. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET) (p. 15–27). Belém. Obtido de http://www.anpet.org.br/ssat/interface/content/autor/trabalhos/publicacao/2013/440_AC.pdf.
- UNICA. (2017) RenovaBio: Cenários e Simulação de Impacto. Obtido de <http://www.unica.com.br/renovabio/>.
- Vaz, A. V., Oliveira, K. N., e Damasceno, P. E. (2005) O modal dutoviário: análise da importância e considerações sobre suas principais características. Fortaleza.
- 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/teses/disponiveis/11/11132/tde-17072008-152340/>.
- Alessandri, A., Di Febbraro, A., Ferrara and E. Punta (1998) Optimal Control of Freeways via Speed Signalling and Ramp Metering. *Control Engineering Practice*, v. 6, n. 6, p. 771–780. DOI: 10.1016/S0967-0661(98)00083-5.