

GESTÃO AMBIENTAL:

PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COLETADOS NO DISTRITO FEDERAL

Victor Alexander Oliveira Silva¹ (v.alexсандeros@gmail.com), Francisco Javier Contreras Pineda¹ (pineda@unb.br), Camila Lopes dos Santos^{1,2} (camilalopes.eng.amb@gmail.com)

1 Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH) –
Universidade de Brasília (UnB)

2 Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal (SLU/DF)

RESUMO

Otimizar o transporte de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) coletados é um dos principais desafios em se tratando dos sistemas de gerenciamento, visto que esta etapa representa uma grande fração dos custos municipais além de se mostrar como uma das atividades com contribuição significativa nos impactos ao meio ambiente. É notório que o consumo de combustível representa de maneira adequada as duas principais preocupações associadas ao transporte de RSU, pois tem papel fundamental nos custos e é o principal causador das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dessa forma, este trabalho visa otimizar os roteiros de transporte de RSU no Distrito Federal (DF), com base na minimização do consumo de combustíveis pelos veículos utilizados. Os resultados obtidos indicaram que a proposta otimizada proporciona redução de 8,24% no consumo de combustíveis, implicando na economia anual de mais de R\$ 400.000,00 com compra de diesel e redução das emissões de GEE em mais de 9.000 toneladas de CO₂ equivalente por ano.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Transporte; Otimização.

OPTIMIZING OF MUNICIPAL SOLID WASTE TRANSPORTATION USING LINEAR PROGRAMMING: A CASE STUDY IN BRAZIL FEDERAL DISTRICT

ABSTRACT

Optimizing of Municipal Solid Waste (MSW) transportation is one of the main areas or concern for managers since this stage represents a large fraction of municipal costs, as well as being one of the activities with a significant contribution to the impacts on the environment. Certainly, fuel consumption adequately represents the two main concerns associated with MSW transport, since it plays a key role in costs and is the main cause of Greenhouse Gas (GHG) emissions. Thus, this article presents an optimization approach for MSW transportation through linear programming applied on Federal District, based on fuel consumption minimization. The results indicate that the proposed scheme provides a reduction of 8.24% in fuel consumption which implied an annual savings of more than 400.000 BRL and the reduction of GHG emissions in more than 9,000 tonnes of CO₂-equivalent per year.

Keywords: Municipal solid waste; Transportation; Optimization.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos problemas associados ao rápido crescimento populacional nas últimas décadas encontra-se a geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2016), o Brasil produziu no ano de 2016 aproximadamente 78,3 milhões de toneladas de RSU, dos quais 71,3 milhões de toneladas foram coletadas, resultando em um índice de cobertura de coleta de 91%. Observou-se ainda que a geração de RSU registrou queda de 2% em relação ao ano anterior.

Nesse sentido, é evidente a necessidade de gerenciamento adequado dos resíduos gerados. Usualmente as atividades de gerenciamento de RSU englobam desde a separação na fonte geradora até a disposição final, incluindo as etapas de coleta e transporte e tratamento.

Dentro dessas etapas de gerenciamento, a coleta e transporte consistem em uma das principais questões, uma vez que constituem uma grande parcela dos custos. Segundo o Banco Mundial (THE WORLD BANK, 2012) essas etapas representam, aproximadamente, entre 80 e 90% dos custos municipais com o gerenciamento de RSU em países de baixa renda e entre 50 e 80% em países de renda média.

Segundo Silva (2018), no Distrito Federal o transporte dos RSU coletados consiste na etapa de gerenciamento que mais contribui para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente em função das grandes distâncias entre os centros urbanos e os locais de destino dos resíduos sólidos coletados e da logística não-otimizada de transporte.

Assim, tendo em vista o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento econômica e ambientalmente adequados, fica evidente a necessidade de otimizar os roteiros de transporte dos resíduos sólidos coletados, de forma a diminuir os custos associados a esta etapa, além do impacto ambiental, em termos de emissões de GEE na atmosfera.

Dentro dessa perspectiva, pode-se afirmar, segundo Tavares et al. (2009) que o consumo de combustível tem um papel fundamental dentro das planilhas de custos dos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos. Também é válido ressaltar que as emissões atmosféricas na etapa de transporte são decorrentes da queima de combustíveis fósseis no motor dos veículos. Portanto, como o consumo de combustíveis é diretamente ligado às duas principais preocupações acerca do transporte de RSU, é razoável otimizar os roteiros de transporte na perspectiva de redução do consumo de combustíveis.

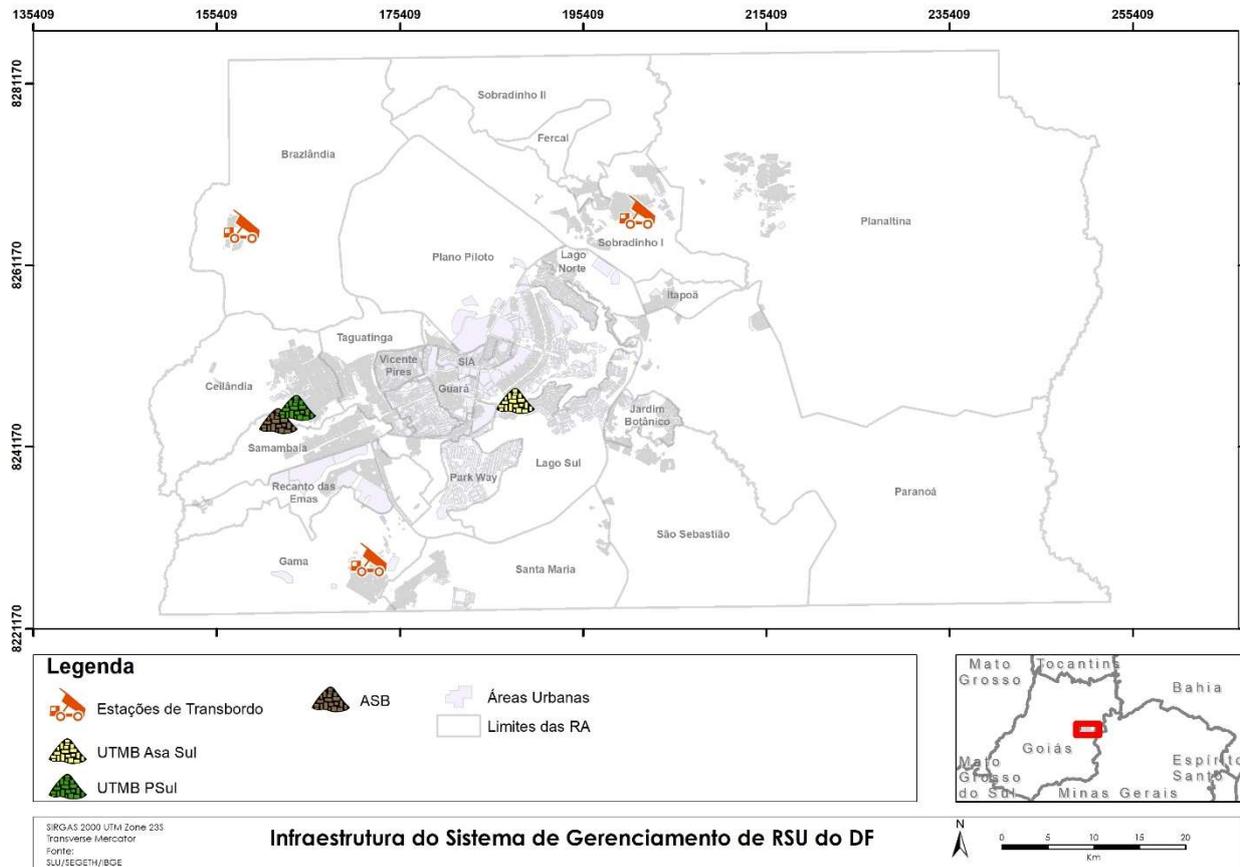
1.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado no Distrito Federal (DF), uma das vinte e sete unidades federativas do Brasil. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017), a população estimada do DF no ano de 2017 era de 3.039.444 habitantes. No mesmo ano, foram coletadas pelo Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal – SLU/DF, órgão responsável pelos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos e pelo gerenciamento dos resíduos sólidos do DF, 810.339 toneladas de resíduos sólidos domiciliares e resíduos de varrição (SLU, 2017).

O sistema de tratamento de RSU do DF possui duas usinas de tratamento mecânico-biológico (UTMB) em funcionamento, uma localizada na Avenida L4 Sul, com capacidade de processamento de 100 t por dia e outra localizada no Setor P Sul, em Ceilândia, com capacidade de processamento de 600 t diariamente. Além disso, estão em funcionamento cinco instalações de recuperação de resíduos (IRR), que se definem como usinas de triagem de material proveniente da coleta seletiva de resíduos recicláveis operadas por cooperativas de catadores (SILVA, 2017; SLU, 2017).

Segundo o SLU (2017), existem três unidades de transferência de resíduos sólidos no DF, chamadas de estações de transbordo. Estas estão localizadas nas Regiões Administrativas (RAs) Sobradinho, Brazlândia e Gama. Nestas instalações, os resíduos coletados por meio de caminhões compactadores são transferidos para carretas de maior capacidade e menor consumo de combustível, visando à viabilidade econômica das operações de transporte dos resíduos para as unidades de tratamento e disposição final. Além dessas três unidades onde se realiza exclusivamente a operação de transferência, a UTMB da Asa Sul também realiza este tipo de operação. As unidades de gerenciamento de RSU existentes no DF podem ser visualizadas na *Figura 1*.

Figura 1: Mapa de infraestruturas do sistema de gerenciamento de RSU do DF



2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo otimizar a etapa de transporte dos resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal, com base na minimização do consumo de combustível pelos veículos utilizados.

3. METODOLOGIA

O cenário atual foi caracterizado a partir de informações acerca da destinação dos RSU de cada RA obtidas junto ao SLU/DF. É importante salientar que as informações são baseadas nos atuais contratos de prestação de serviços firmados entre o SLU e empresas privadas.

Realizou-se o estudo de otimização por meio de programação linear inteira binária (PLIB), de acordo com as etapas descritas a seguir.

3.1 Considerações iniciais

Para formulação do problema em questão, considerou-se que:

- A otimização seria voltada apenas à etapa de transporte dos resíduos já coletados. Não se aplica aos circuitos de coleta;
- O consumo de combustíveis fósseis é função da massa transportada e da distância percorrida;
- É possível dividir o transporte dos RSU coletados em duas etapas: (trecho 1) partindo do centro de massa populacional até o local de transferência (transbordo) ou tratamento –

- realizada com caminhões do tipo compactador; (trecho 2) do local de destino na etapa 1 até o local de destinação final (aterro sanitário) – realizada com caminhões do tipo carreta;
- Foram desconsideradas as capacidades de desvio de resíduos do aterro sanitário nas UTMB e considerou-se que todas as unidades de gerenciamento teriam limite de capacidade.

3.2 Modelagem matemática e definição da PLIB

Conforme as considerações iniciais, o consumo de combustíveis no transporte dos RSU coletados foi estimado por meio da equação 1 a seguir.

$$C = f_1 * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i * D1_{ij} + f_2 * \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m P_i * D2_j \right) \quad (1)$$

Onde:

C é o consumo anual de combustível – diesel (l/ano);

f_1 é o fator de consumo de combustível do caminhão compactador, igual a 0,15 l/ton.km (MERRILD et. al, 2012);

f_2 é o fator de consumo de combustível do caminhão carreta, igual a 0,03 l/ton. (MERRILD et. al, 2012);

P_i é o total de RSU coletados na RA i ;

$D1_{ij}$ é a distância entre o centro de massa da RA i até a unidade de transbordo/tratamento j ;

$D2_j$ é a distância entre a unidade de transbordo/tratamento j e o aterro sanitário;

A função objetivo da programação linear aplicada é descrita pela equação 2 e as restrições são apresentadas pelas equações 3 e 4.

$$FO = MIN \left[f_1 * \sum_{i=1}^{31} \sum_{j=1}^6 P_i * D1_{ij} * X_{ij} + f_2 * \sum_{j=1}^6 \left(\sum_{i=1}^{31} P_i * D2_{ij} * X_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

Sujeita a:

$$\sum_{j=1}^6 X_{ij} = 1; \forall i, j \quad (3)$$

$$X_{ij} \in I \mid X_{ij} \in [0,1]; \forall i, j \quad (4)$$

Onde:

C é o consumo anual de combustível – diesel (l/ano);

f_1 é o fator de consumo de combustível do caminhão compactador, igual a 0,15 l/ton.km (MERRILD et. al, 2012);

f_2 é o fator de consumo de combustível do caminhão carreta, igual a 0,03 l/ton.km (MERRILD et. al, 2012);

P_i é o total de RSU coletados na RA i ;

$D1_{ij}$ é a distância entre o centro de massa da RA i até a unidade de transbordo/tratamento j ;

$D2_j$ é a distância entre a unidade de transbordo/tratamento j e o aterro sanitário;

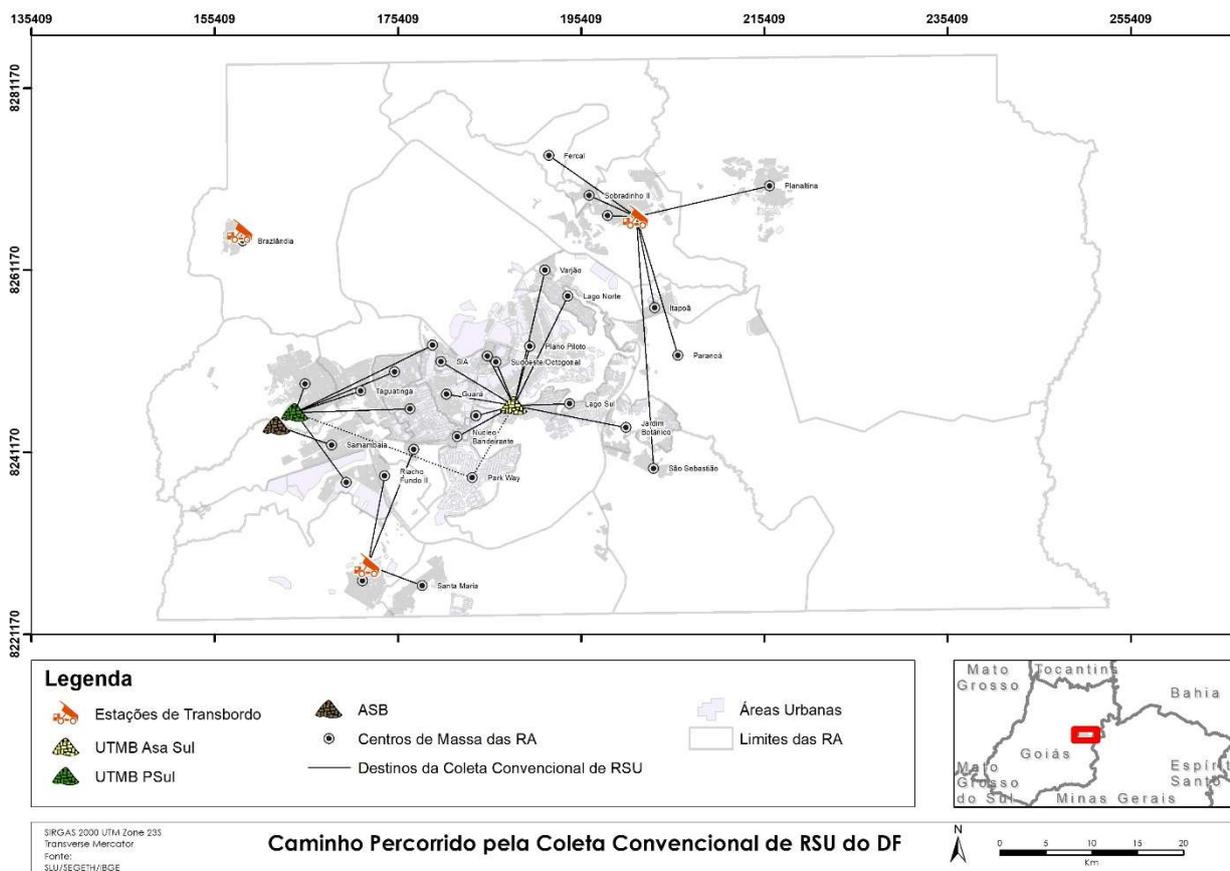
X_{ij} é a matriz de soluções, preenchida com valores binários, que indica se os RSU coletados na RA i serão ou não encaminhados à unidade j .

A solução foi obtida por meio do método Simplex, utilizando o software LINGO®.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atuais destinos dos RSU coletados no DF são apresentados na *Figura 2*.

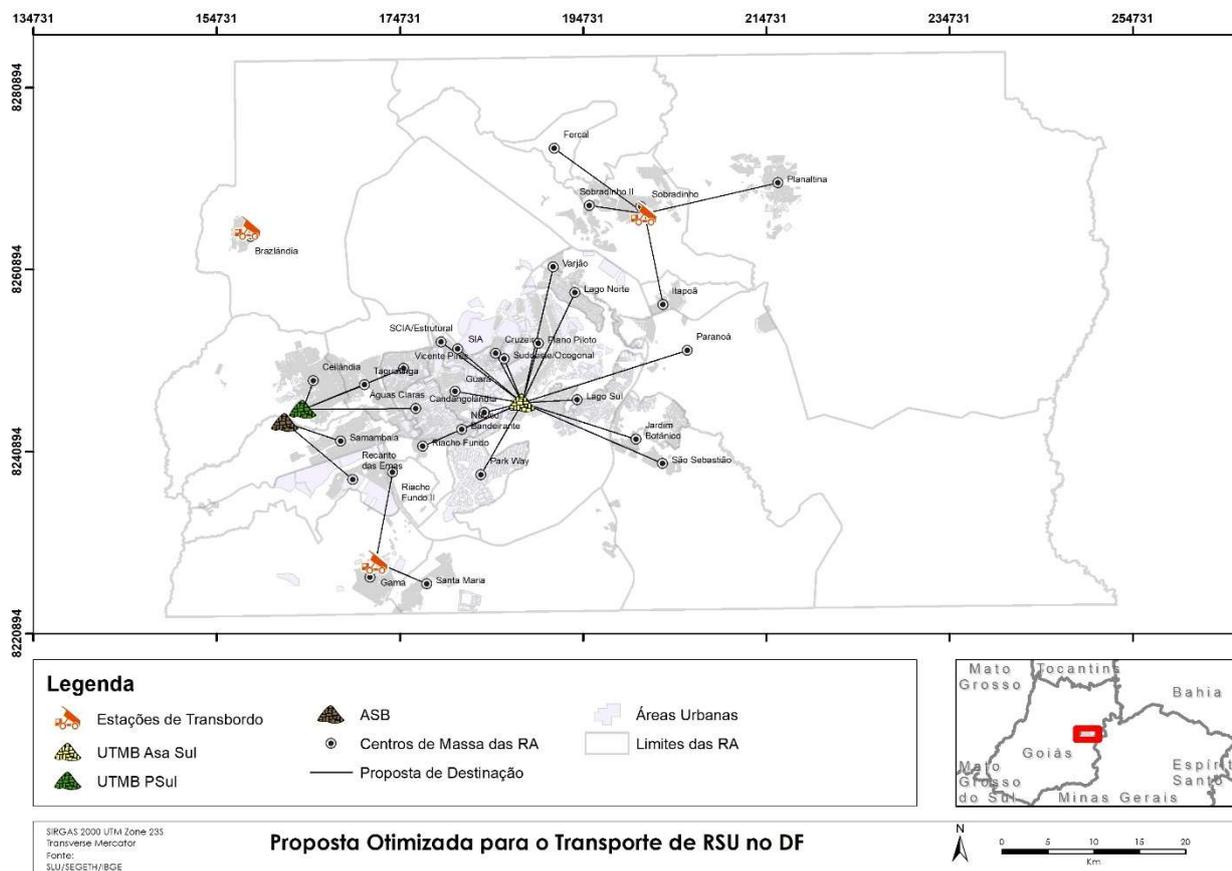
Figura 2: Atuais destinos dos RSU coletados no DF



É possível perceber ao observar a *Figura 2* que os atuais destinos dos RSU coletados não constituem a alternativa ótima. Tomando por exemplo a RA São Sebastião, é visível que destinar os resíduos coletados nessa RA para a unidade de transbordo localizada na RA Sobradinho não é a melhor opção, uma vez que essa unidade é mais distante que a UTMB Asa Sul. Sendo assim, a soma dos deslocamentos dos trechos 1 e 2 dessa operação de transporte nos moldes atuais é bem maior que a soma dos deslocamentos em uma possível destinação na UTMB Asa Sul.

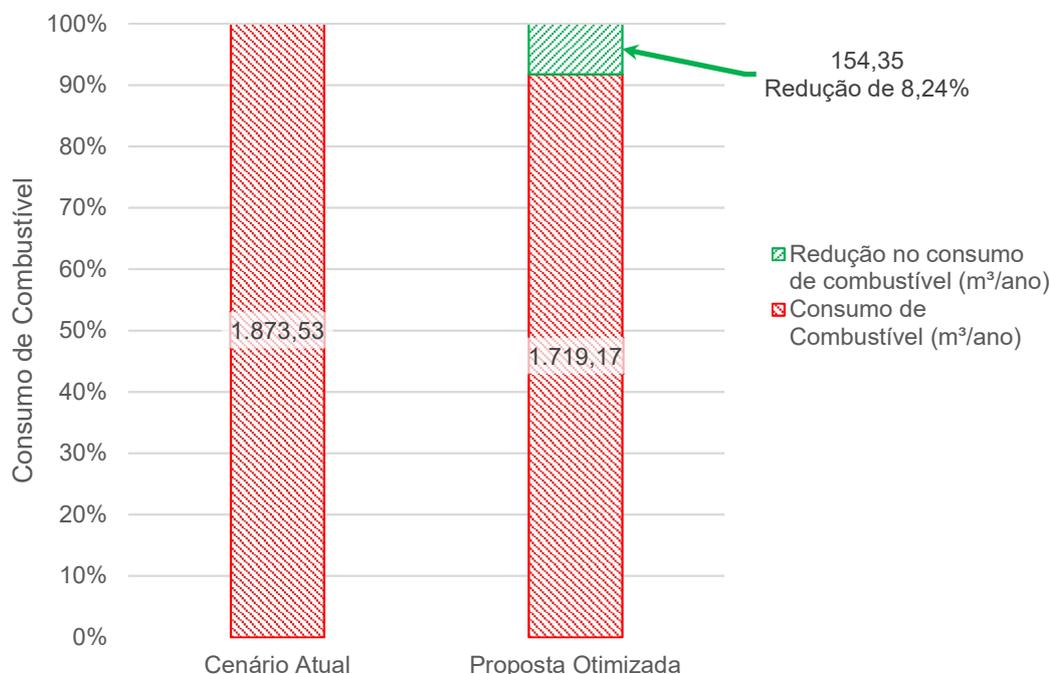
A proposta otimizada obtida por meio da programação linear aplicada é apresentada na *Figura 3*.

Figura 3: Proposta Otimizada para o Transporte de RSU no DF



Para fins de comparação, o consumo de combustíveis no atual cenário de transporte de RSU e na proposta otimizada – estimados pela equação 1 – são apresentados na *Figura 4*.

Figura 4: Comparação do consumo de combustíveis no transporte de RSU no DF na situação atual e na proposta otimizada



Verificou-se que a proposta otimizada para o transporte dos RSU coletados no DF apresentada neste trabalho implica na redução do consumo de combustíveis fósseis em 8,24%. Isso representa uma redução de 154,35 m³ em um único ano.

Apenas para fins de comparação, considerando o preço médio de comercialização combustível no Brasil para o ano de 2018 igual a R\$ 3,22/litro de diesel (PETROBRAS, 2018), a economia financeira proporcionada pela otimização no transporte seria de R\$ 497.013,00/ano, analisando apenas a diminuição na compra de diesel. Vale ressaltar que a economia financeira seria ainda maior, uma vez que o desgaste dos veículos utilizados seria menor com a redução na distância percorrida.

Em se tratando de emissões de GEE, considerando os fatores de emissão de CO₂-equivalente na combustão de diesel do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (BRASIL, 2011), a redução proporcionada pela otimização proposta seria de 9.478,41 toneladas de CO₂-equivalente/ano.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciaram que os atuais roteiros de transporte de resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal não são a alternativa ótima para esta etapa do gerenciamento.

Através de programação linear inteira binária foi possível otimizar a seleção do local de destino dos resíduos coletados em cada região administrativa do DF. A alternativa otimizada proposta promoveu redução de 8,4% no consumo de combustíveis pelos veículos utilizados para o transporte, o que implica na economia de R\$ 497.013,00 por ano com compra de diesel e na redução de emissões atmosféricas a 9.478,41 toneladas de CO₂ equivalente por ano.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos de otimização que incorporem, além do consumo de combustível, a capacidade de tratamento das atuais unidades de gerenciamento do DF e a composição dos RSU coletados, de forma que os resíduos mais propícios ao tratamento sejam

destinados às UTMB, enquanto os que contenham grande fração de rejeitos sejam encaminhados para a disposição final.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016, 2016.

BRASIL. I INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS. 2011.

IBGE. Brasil em Síntese - Distrito Federal. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/brasil/panorama>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

MERRILD, H.; LARSEN, A. W.; CHRISTENSEN, T. H. Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: The importance of efficient energy recovery and transport distances. Waste Management, 2012.

PETROBRAS. Composição de preços ao consumidor. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/diesel/>>.

SILVA, F. L. DA. Hierarquização de alternativas para o gerenciamento de resíduos sólido urbano reciclável no Distrito Federal. Universidade de Brasília, 2017.

SILVA, V. A. O. Análise de alternativas para minimização dos impactos no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos - Estudo de caso no Distrito Federal. Universidade de Brasília, 2018.

SLU. Relatório de atividades. Brasília: 2017.

SLU. Tabela de Distribuição dos Serviços de Coleta Convencional. 2018.

TAVARES, G. et al. Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. Waste Management, 2009.

THE WORLD BANK. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Washington: 2012.