

III-635 - MODELOS DE ROTEIRIZAÇÃO DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: TENDÊNCIAS PARA O BRASIL

Renato Ribeiro Siman⁽¹⁾

Engenheiro Químico (UFRRJ). Mestrado e Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento (USP). Professor Associado do Departamento de Engenharia Ambiental (UFES).

Eloisa de Souza Fia⁽¹⁾

Administradora (FAESA). Mestre em Psicologia Social e Doutorado em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (PUC-SP).

Emerson Vicente Neves Pereira⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental (FAESA) e de Segurança do Trabalho (UCL).

Verginia Januario dos Reis Rocha⁽¹⁾

Engenheiro Civil (UFES). Mestre em Engenharia Ambiental (UFES).

Endereço⁽¹⁾: Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental, Salas 20 e 21, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo. Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória-ES, CEP: 29.075-910, Brasil - Tel: (27) 3335-2168 - e-mail: lagesa@ufes.br.

RESUMO

Dentre as etapas do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos a coleta e o transporte tem se apresentado com as de maior gasto devido ao custo logístico. Por isso, gestores públicos têm sido motivados a buscarem a otimização dos serviços gerando ganhos financeiros e ambientais. Neste contexto, o uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) para coletar e transportar os RSU tem ganhado destaque, pois são capazes de modelar a roteirização de veículos (MRV) reduzindo o tempo de viagens e distâncias através da programação com equações matemáticas. Este artigo busca descrever os avanços no planejamento de rotas para coleta e transporte dos RSU produzidos com uso de TICs, bem como avaliar o impacto que tais tecnologias podem trazer para as cidades brasileiras. Para tanto foi realizada uma pesquisa bibliométrica utilizando a ferramenta de análise quantitativa de código aberto Bibliometrix apresentada por Aria e Cuccurullo (2017), em artigos científicos relacionados com a temática em questão, delimitada no período 2015 a 2020. A partir do portfólio final de artigos foram identificados os autores, artigos e revistas mais relevantes em relação ao tema do estudo e que no processo de otimização de coleta e transporte de RSU a utilização de modelos e programação apresentam soluções logísticas que possibilitam ganhos ambientais e econômicos

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos Sólidos Urbanos, Roteirização, Bibliometrix R-Tool, Gerenciamento, Tecnologias de Informação e Comunicação.

INTRODUÇÃO

Os problemas envolvendo coleta e transporte de RSU e seus custos são um dos dilemas operacionais mais difíceis para resolução para sistema integrado de gestão de resíduos (RABBANI; SADRI, 2017). A coleta e transporte é reconhecida mundialmente por acarretar o maior gasto com a gestão desse serviço (JACOBSEN et al., 2013), representando aproximadamente 60 a 80% deste gasto (TIRKOLAEI, 2019a, 2019b; RIZVANOĞLU, 2019).

Com custo aproximado de R\$ 22 bilhões para o manejo de RSU no Brasil em 2019, cerca de R\$ 15,50 bilhões foram gastos somente em coleta e transporte (SNIS, 2020), descrevendo que os custos são fortemente influenciados com a densidade habitacional dos municípios brasileiros.

Embora já sejam serviços caros, Segundo MUNGUÍA-LÓPEZ (2020) o banco mundial prevê crescimento de um bilhão de toneladas de RSU nos países em desenvolvimento entre os anos de 2012 e 2025. O autor descreve que se hoje a gestão desses resíduos já se demonstra problemática, no futuro inconvenientes ainda mais difíceis

serão enfrentados, uma vez que não há infraestrutura para dar conta desse crescimento, o que impactará sobremaneira nos custos financeiros, de roteirização, ambientais e sociais das cidades geradoras.

Para reduzir os custos, as autoridades municipais foram motivadas a desenvolver novas estratégias, avaliação das aplicações de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) para coletar e transportar RSU, particularmente descritas para centros urbanos (KHODAPARAST; RAJABI; EDALAT, 2018). Dentro deste cenário, o termo smart city tem sido amplamente utilizado, e definido por LU et. al. (2020) como aquela cidade que promove a aplicação de ações para adquirir, analisar e integrar informações importantes sobre as cidades, sempre em respostas aos desafios de escassez de recursos e/ou poluição ambiental, como o ocasionado pelo congestionamento de tráfego.

Em 2000 surgiram os primeiros estudos que modelaram a roteirização de veículos (MRV) com o objetivo de reduzir o tempo de viagens e distâncias através da programação com equações matemáticas. Já em 2010 os MRV já tinham como objetivo a redução dos custos da coleta de RSU, através da projeção de cenários e cálculo, de dimensionamento e localização, de unidades do sistema de coleta. Neste mesmo tempo surgiram os primeiros modelos de programação linear mista (SON; LOUATI, 2016).

OBJETIVOS

O presente artigo tem como intenção descrever os avanços no planejamento de rotas para coleta e transporte de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidos com ferramentas inteligentes, chamadas de Tecnologias de Comunicação e Informação (TIC) bem como avaliar o impacto que tais tecnologias podem trazer para as cidades brasileiras. Também será objeto desse artigo apresentar quais são os efeitos de novos modelos de roteirização em tempo real nos custos do oferecimento do serviço de coleta de RSU.

Para tal, serão descritos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar portfólio bibliométrico acerca dos estudos desenvolvimentos sobre o uso das TIC nos modelos de processo de coleta de RSU;
- Descrever modelos de roteirização de outros países utilizados no processo de coleta de RSU;
- Descrever modelos de utilização de diferentes tecnologias da informação TIC dentro dos modelos de roteirização no processo de coleta de RSU.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para composição da revisão bibliográfica deste estudo foi realizada uma pesquisa bibliométrica utilizando a ferramenta de análise quantitativa de código aberto Bibliometrix apresentada por Aria e Cuccurullo (2017).

A partir de uma breve pesquisa exploratória em artigos científicos relacionados com a temática em questão, foram definidos os principais termos de busca os quais foram inseridos nas bases de dados da Scopus (Elsevier) e da Web of Science (Coleção Principal - Clarivate Analytics), para obtenção dos metadados necessários para o mapeamento. A seleção das bases de dados Scopus e Web of Science deveu-se à sua maior relevância para a busca na literatura e por apresentarem metadados completos necessários para o uso da ferramenta.

A pesquisa foi delimitada no período 2015 a 2020. O Quadro 1 apresenta os termos de busca escolhidos para esse trabalho bem como os operadores booleanos definidos para a restrição do universo de artigos a serem pesquisados.

Quadro 1 – Critérios de busca e operadores booleanos definidos para composição da revisão bibliográfica.

Campos de seleção	Critérios de busca
Título, resumo ou palavras-chave	[("optimization model*" OR "vehicle model") AND ("waste collection" OR "solid waste collection" OR "municipal solid waste") AND ("collection" OR "collection on demand") AND ("routing" OR "optimization") AND TOPIC: ("MUNICIPAL SOLID WASTE" OR "msw collection" OR "municipal solid waste collection" OR "MSW" OR "household waste") AND TOPIC: ("collection" OR "collection on demand") AND TOPIC: ("cost" OR "profit*") AND ("routing" OR "real-time routing" OR "routing templates") AND ("msw collection" OR "municipal solid waste" OR "private waste")]
Data da publicação	Últimos 5 anos (01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2020)
Tipo de documento	Artigo

Após remoção de documentos duplicados os metadados dos artigos foram inseridos em uma planilha no software Excel contendo informações relevantes como ano, título, autores, fator de impacto e número de citações entre outras. Posteriormente foi realizada a filtragem dos artigos por meio da avaliação e eliminação dos artigos cujo título, resumo ou palavras-chave não condiziam com o tema pesquisado. Selecionados os artigos, procedeu-se a leitura e análise sistemática deles, para concepção do portfólio final.

RESULTADOS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A coleta é o ponto chave para a sustentabilidade da gestão de RSU e com isso novos modelos de coleta surgiram com a ampla aplicação de TIC e Internet of Things (IoT), chamadas de coletas inteligentes. A maioria dos casos de coleta inteligente documentados são em países em desenvolvimento e ainda em estágio experimental, logo, torna-se difícil a discussão de custos operacionais e eficiência do sistema. Os estudos sobre tecnologias inteligentes apresentam mais foco na tecnologia e acabam negligenciando um pouco os modelos de negócios e organizacional da coleta (XUE et al., 2019).

O Quadro 2 apresenta os principais artigos encontrados para o caso estudado.

Quadro 2 – Artigos mais relevantes sobre o tema do estudo.

Autor	Modelo	Objetivo
Mamun et. al. (2016)	Algoritmos baseados em bancos de dados e sensores wireless.	Informações em tempo real do status de preenchimento dos recipientes para uma coleta mais eficiente.
Król, Nowakowski e Mrówczyńska (2016)	Algoritmo genético empregado para otimizar o tamanho da rota, número de veículos e outras variáveis para representação da satisfação dos usuários, conjugado com o emprego de canais de comunicação em websites e aplicativos de smartphones para demandar coleta residencial.	Descrevem um novo modelo para aplicação no sistema de coleta, onde a demanda deve ser gerada pelos usuários. Este tipo de coleta gera mais conforto para as partes interessadas, indicando o dia e o horário da coleta a ser realizada.
Nowakowski et. al. (2017)	Algoritmo genético com lógica difusa empregado para otimizar as rotas dos veículos e selecionar a quantidade de veículos em uma frota heterogênea	Propõem abordagem multicritério para coleta por demanda de REE em residências e lojas de aparelhos eletrônicos, baseado em método de eficiência de custos.
Nowakowski et al. (2018)	Algoritmos de inteligência artificial proposto inclui modelos paramétricos de quatro algoritmos (simulated annealing - SA, tabu search, greedy - GrA e otimização com colônia de abelhas).	O sistema foi desenvolvido para resolver o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo para frota heterogênea de veículos de coleta de resíduos.

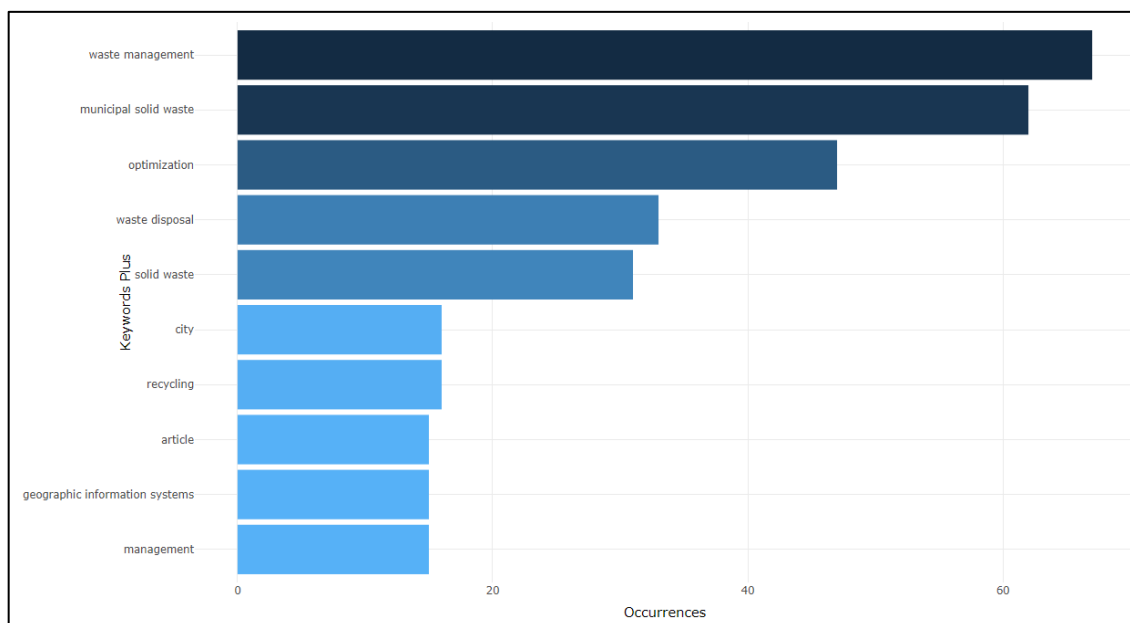
Autor	Modelo	Objetivo
Xue et al. (2019)	Algoritmo baseado na análise de big data das empresas de coleta e transporte entrevistadas.	O sistema foi desenvolvido para verificar seus modelos organizacionais e as vantagens sobre o sistema informal de coleta.
Wu et. al. (2020)	Algoritmo híbrido que combina modelo de otimização de enxame de partículas e a capacidade de otimização e um algoritmo de meta heurística denominado de “recozimento simulado”.	Uso de redes de sensores wireless foram implantados nos contentores para identificar os níveis de enchimento com monitorização remota e demandar coleta em tempo real, possibilitando redução de 12% nos custos relacionados a rotas das coletas.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir de uma breve pesquisa exploratória em artigos relacionados com a temática em questão, foram definidos os principais termos de busca os quais foram inseridos nas bases de dados Scopus e Web of Science para mensurar o número de artigos encontrados e assim avaliar a importância do termo escolhido e uso de operadores booleanos.

A Figura 1, 2 e 3 descrevem o resultado da busca com informações da relevância dos termos utilizados, países com mais citações e artigos mais citados, respectivamente.

Figura 1 – Resultado da busca de portfólio por relevância.



Pela revisão da literatura, percebe-se que o método tradicional de roteamento para coleta de RSU consiste em recolher os resíduos domiciliares porta a porta, enquanto os resíduos secos são recolhidos a partir de Pontos de Entrega Voluntária (PEV) com escalas e itinerários pré-definidos e transportar os resíduos até a estação de disposição em caminhões ao longo das rotas estipuladas (ABDALLAH et al., 2019).

Conforme os autores, esse processo gera custos trabalhistas, com combustível, com manutenção, dentre outros, sendo considerado um custo muito alto e responsável pela maior parte dos gastos com gerenciamento de resíduos urbanos.

Figura 2 – Resultado da busca de portfólio por países mais citados.

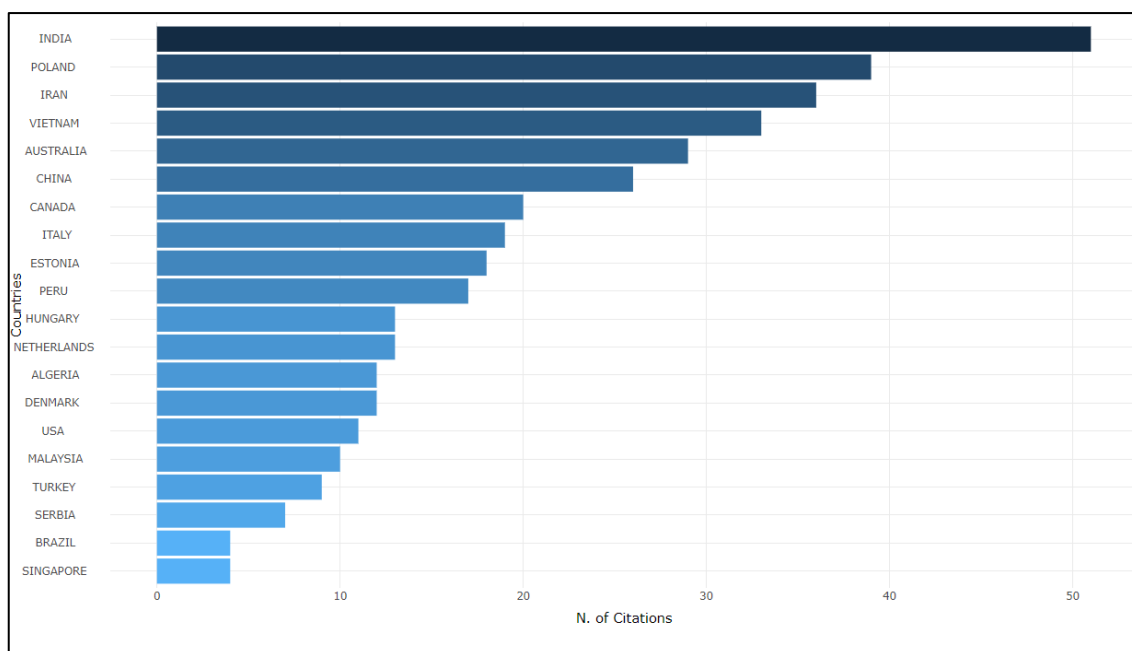
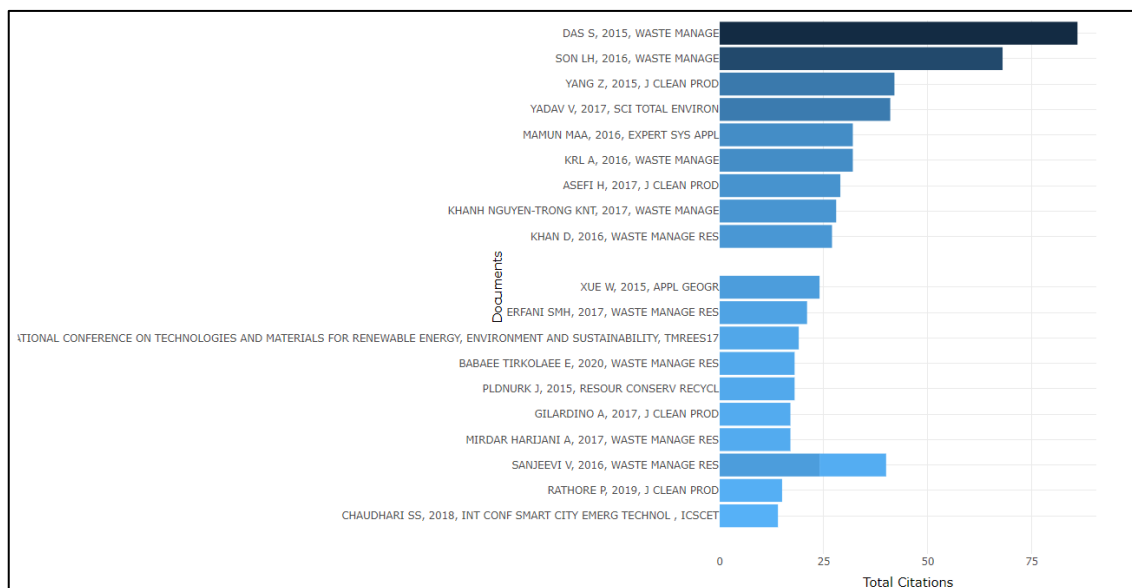


Figura 3 – Resultado da busca de portfólio por artigos mais citados.



Por essa razão, muitos autores propuseram uma abordagem para coletar resíduos de acordo com os níveis de enchimento das lixeiras, que são previstos com base em dados históricos (EXPÓSITO-MARQUEZ, 2019; MAMUN, 2016) ou sensores (FERRER, 2019; MAMUN, 2016) obtidos de lixeiras e caminhões. Abdallah et al. (2019) desenvolveu um procedimento de coleta de lixeiras que possuem altos níveis de enchimento com base em séries históricas. Mamun et al. (2016) apresentou um sistema de monitoramento de lixeira com tecnologia de sensor e um sistema de interação (IoT), os resultados experimentais mostraram que o sistema pode auxiliar com um modelo de otimização de rotas.

Assim, por exemplo, no processo de otimização de coleta e transporte de RSU a utilização de modelos e programação apresentam soluções logísticas que possibilitam ganhos ambientais e econômicos (SON; LOUATI, 2016). Podem ser utilizadas metodologias como: as que utilizam apenas dos modelos matemáticos para programação linear e não linear (RABBANI; SADATI; FARROKHI-ASL, 2020; RATHORE; SARMAH,

2020), ou por vezes pode estar associadas a algoritmos com nas metodologias de meta heurística (GILARDINO et al., 2017; TIRKOLAEI et al., 2019b), programação com linguagem C (KHAN; SAMADDER, 2014) e modelo de colônia de formigas (TIRKOLAEI et al., 2019a; YI; MI, 2019).

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Partindo-se do conhecimento dos altos custos envolvidos no processo de coleta e transporte de RSU e a tendência de utilização de diferentes ferramentas de otimização, percebe-se a necessidade de necessário analisar os efeitos de novos modelos de roteirização em tempo real de coleta de resíduos sólidos urbanos nos custos do oferecimento do serviço.

Diversos autores concluem sobre reduções em comprimento e tempo de execução de rotas, reduzindo na mesma proporção custos e produção de impactos ambientais causados pela produção de gases de efeito estufa, bem como partículas finas inaláveis.

Diversos autores avaliaram estratégias de modelagem e tratamento variado de amplo banco de dados, com informações sobre o sistema de gerenciamento de resíduos em cidades distribuídas no mundo. De todas as formas, percebe-se que mesmo com uma frota heterogênea de veículos e para a tomada de decisão do ponto de vista econômico, ambiental, técnico e social, todas as informações são importantes para o processo de tomada de decisão de longo prazo de gestão em uma cidade inteligente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.
2. ABDALLAH, M. et al. Simulation and optimization of dynamic waste collection routes. *Waste Management Res*, v. 37, n.8, p. 793-802, 2019.
3. EXPÓSITO-MÁRQUEZ, A. et al. Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma. *Comput. Ind. Eng*, v. 137, 2019.
4. FERRER, J.; ALBA, E. BIN-CT: Urban waste collection based on predicting the container fill level. *J. Biosyst.*, v. 186, 2019.
5. GILARDINO, A.; et al. Combining operational research and Life Cycle Assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in Lima (Peru). *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 589-603, 2017.
6. JACOBSEN, R., BUYASSE, J., GELLYNCK, X. Cost comparison between private and public collection of residual household waste: multiple case studies in the Flemish region of Belgium. *Waste Management*, v. 33, n. 1, p. 3-11, 2013.
7. KHAN, D.; SAMADDER, S. R. Municipal solid waste management using geographical information system aided methods: a mini review. *Waste Management*, v. 32, n. 11, 2014.
8. KRÓL, A.; NOWAKOWSKI, P.; MRÓWCZYŃSKA, B. How to improve WEEE management? Novel approach in mobile collection with application of artificial intelligence. *Waste Management*, v. 50, p. 222-233, 2016.
9. KHODAPARAST, M., RAJABI, A.M. & EDALAT, A. Municipal solid waste landfill siting by using GIS and analytical hierarchy process (AHP): a case study in Qom city, Iran. *Environ Earth Sci* 77, 52 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7215-3>
10. LU, X., PU, X., HAN, X. Sustainable smart waste classification and collection system: A bi-objective modeling and optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 124183, 2020.
11. MAMUN, M. A. A. et al. Theoretical model and implementation of a real time intelligent bin status monitoring system using rule based decision algorithms. *J. Expert Syst. Appl.*, v.48, p. 76-88, 2016.
12. MUNGUÍA-LÓPEZ, D. C. A. Optimization of municipal solid waste management using a coordinated framework. *Waste Management*, v. 115, p. 15-24, 2020.
13. NOWAKOWSKI, P.; KRÓL, A.; MRÓWCZYŃSKA, B. Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation. *Waste Management*, v. 69, p. 377-392, 2017.
14. NOWAKOWSKI, P.; SZWARC, K.; BORYCZKA, U. Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 63, p. 1-22, 2018.

15. RABBANI, M.; SADATI, S. A.; FARROKHI-ASL, H. Incorporating location routing model and decision making techniques in industrial waste management: Application in the automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, v. 148, p. 106692, 2020.
16. RATHORE, P.; SARMAH, S. P. Economic, environmental and social optimization of solid waste management in the context of circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, p. 106510, 2020.
17. RIZVANOĞLU et al. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, through linear programming and geographic information system: a case study from Şanlıurfa, Turkey. *Environ Monit Assess*, v.192, n. 9, 2020.
18. SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2018. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2020. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2018>>. Acessado em: 25 de out. 2020.
19. SON, L. H.; LOUATI, A. Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows. *Waste Management*, v. 52, p. 34-49, 2016.
20. TIRKOLAEI, E. B. et al. Developing an applied algorithm for multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste collection: A case study. *Waste Management & Research*, v. 37, 2019b.
21. TIRKOLAEI, E. B. et al. A hybrid augmented ant colony optimization for the multi-trip capacitated arc routing problem under fuzzy demands for urban solid waste management. *Waste Management & Research*, v. 38, n. 2, 2019a.
22. YI H, MA H. Optimization of municipal solid waste logistics system based on data envelopment analysis. *Ekoloji*, v. 28, n. 107, p. 2643-2654, 2019.
23. XUE, Y et al. Can intelligent collection integrate informal sector for urban resource recycling in China? *Journal of cleaner production*, v. 208, p. 307-315, 2019.
24. WU, H.; TAO, F.; YANG, B. Optimization of vehicle routing for waste collection and transportation. *Int. J. Environ. Res. Public Health* v. 17, n. 14, p. 17, 2020.