



## UM ESTUDO SOBRE PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS *GREEN*

**Luiza Amalia Pinto Cantão**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP  
Av. Três de Março, 511, CEP 18087-180, Sorocaba – SP  
luiza@sorocaba.unesp.br

**Renato Fernandes Cantão**

Universidade Federal de São Carlos – Campus de Sorocaba  
Rodovia João Leme dos Santos Km 110, Sorocaba – SP  
rfcantao@ufscar.br

### RESUMO

A poluição do ar é um grave problema ambiental nos dias de hoje afetando diretamente a saúde dos seres vivos. Parte desta poluição é emitida pelos veículos automotores. Logo, apresentaremos aqui os trabalhos mais relevantes sobre Problemas de Roteamento de Veículos que abordam a emissão de poluentes de maneira direta e indireta. Na literatura, têm-se denotado por *Green Vehicle Routing Problem*, e boa parte deles trata da emissão de CO<sub>2</sub>, o dióxido de carbono.

**PALAVRAS CHAVE.** Problemas de Roteamento de Veículos, Poluição do Ar, Estado da arte.

**Roteamento de Veículos, Logística e Transporte, Pesquisa Operacional**

### ABSTRACT

Air pollution is a serious environmental problem nowadays, directly affecting the health of living beings. Part of this pollution is emitted by motor vehicles. Therefore, we will present here the most relevant works on Vehicle Routing Problems that address the emission of pollutants directly and indirectly. In the literature, they have been denoted by *Green Vehicle Routing Problem*, and many of them deal with the emission of CO<sub>2</sub>, carbon dioxide.

**KEYWORDS.** Vehicle Routing Problem, Air Pollution, State of the art.

**Vehicle Routing, Logistics and Transportation, Operations Research**



## 1. Introdução

Poluição é a introdução de contaminantes no meio ambiente que provocam alterações adversas através de atividades e intervenções humanas no ambiente. Os efeitos da poluição podem ocorrer de forma localizada, regional ou global. Os poluentes são resíduos gerados pelas atividades humanas causando um impacto ambiental negativo, podendo estar presentes no solo, na água ou no ar, como apresenta Braga et al. [2005].

Neste trabalho o interesse é pela *poluição do ar*, que são mudanças da atmosfera devido a liberação de substâncias nocivas. Entre os efeitos globais de poluição do ar, temos o *efeito estufa*, provocado pelos *Gases de Efeito Estufa – GEE*, que ocorre nos centros urbanos das grandes cidades, vide CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo).

O efeito estufa, como descreve Braga et al. [2005], é responsável por manter a temperatura média do planeta em torno de 15°C. Porém a emissão excessiva dos GEE (CO<sub>2</sub>, metano, óxido nitroso e clorofluorcarbono CFCs) tem aumentado a temperatura da atmosfera, ocasionando mudanças climáticas que podem elevar o nível dos oceanos, trazer impactos na agricultura e silvicultura e afetar todas as formas de vida do planeta. A maior fonte de emissão de GEE é a queima de combustíveis fósseis, presentes, por exemplo, na geração de eletricidade, transporte, indústria, entre outros, como mostra a United States Environmental Protection Agency.

O transporte é responsável pelo movimento de pessoas e mercadorias através de veículos automotores diversos. A maioria das emissões de GEE através do setor de transporte são emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) resultante da combustão de produtos à base de petróleo, como a gasolina e diesel, em motores de combustão interna, que incluem carros de passageiros, caminhões e vans.

Como ação mitigadora para diminuir a emissão de GEE, na data de 11 de dezembro de 1997, em Quioto, Japão, foi elaborado um acordo internacional ligado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC), com o objetivo de reduzir a emissão de GEE em todos os países, colocando níveis diferenciados para 38 países que mais emitem gases. Entre os gases listados, está o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), como mostra o relatório das Nações Unidas [1998].

O Protocolo de Quioto determinou cotas máximas de GEE que os países desenvolvidos podem emitir. Conseqüentemente, se uma empresa ou pessoa reduz a emissão de GEE, gera-se a *Redução Certificada de Emissões – RCE* ou *Créditos de Carbono* — que podem ser negociados com outras empresas, pessoas ou outros países que ultrapassaram a cota de emissão.

Logo, uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) corresponde a um crédito de carbono, que pode ser negociado no mercado internacional, que corresponde a comprar uma permissão para emitir GEE. O seu valor deve ser inferior ao da multa que o emissor deverá pagar ao poder público por ultrapassar a cota de GEE, ou seja, obter o Crédito de Carbono é ter um desconto sobre a multa recebida, vide Engenharia Ambiental [2013]. Com isso, é possível quantificar a emissão dos GEE em um valor *equivalente em dióxido de carbono* (CO<sub>2</sub>e). Desta forma, quantidades de gases diferentes são convertidas em uma mesma unidade.

Dada a necessidade eminente de reduzir as emissões GEE — em particular do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) — várias soluções diferentes têm sido propostas para os mais diversos setores da atividade humana, como na indústria (Fischedick et al. [2014]), na produção de energia (Fischedick et al. [2014]) e na agricultura (Smith et al. [2014]), além do já citado setor de transportes (Sims et al. [2014]).

Neste rol de possíveis ações rumo a uma redução de emissões de gases por veículos automotores, está o seu uso mais racional através da implementação de rotas de transporte que visem a *minimização do consumo de combustível* e conseqüente redução da emissão de gases. Desta forma, um estudo sobre o estado da arte em *Problemas de Roteamento de Veículos (PRV)* e emissões deste tipo de poluente é o que se busca mostrar neste trabalho. Na literatura o PRV com enfoque ambiental é denotado por *Green Vehicle Routing Problem – GVRP*.



Na seção 2 apresentamos a formulação matemática de um Problema de Roteamento de Veículos clássico, na seção 3 apresentamos uma revisão da literatura sobre GVRP, na seção 4 as considerações finais e perspectivas futuras de pesquisa em GVRP, finalizando com as referências bibliográficas.

## 2. O Problema de Roteamento de Veículos

Seja  $G = (V, A)$  um grafo onde  $V = \{0, 1, \dots, n\}$  é o conjunto de vértices que representam os pontos de coleta, com o depósito localizado no vértice 0 por convenção. Seja  $A$  o conjunto de arcos que ligam os vértices  $i$  e  $j$ . Cada arco  $(i, j)$ ,  $i \neq j$  está associado com uma matriz de distância, com valores não negativos  $C = (c_{ij})$ , que representam o custo de viagem ou tempo de viagem. Geralmente o uso do arco  $(i, i)$  é proibido impondo-se  $c_{ii} = +\infty$ ,  $\forall i \in V$ , como em Arenales et al. [2007].

Seja  $K$  o número de veículos disponíveis no depósito, assumindo que todos tenham a mesma capacidade (frota homogênea). O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) consiste em designar um conjunto de rotas de veículos com o menor custo de maneira que:

1. cada ponto de coleta em  $V \setminus \{0\}$  é visitado apenas uma vez por um único veículo;
2. todos os veículos começam e terminam a sua rota no depósito;
3. a somatória das demandas dos pontos de coleta visitados por uma rota não exceda a capacidade do veículo (neste caso, temos o PRVC – Problema de Roteamento de Veículos Capacitado).

Matematicamente, segue a formulação do PRVC, baseada em Xiao et al. [2012].

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1a)$$

$$\text{Sujeito a } \sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (1b)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} - \sum_{j=0}^n x_{ji} = 0, \quad \forall i = 0, \dots, n \quad (1c)$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n y_{ij} - \sum_{j=0, j \neq i}^n y_{ji} = D_i, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (1d)$$

$$y_{ij} \leq Q x_{ij}, \quad \forall i, j = 0, \dots, n \quad (1e)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j = 1, \dots, n. \quad (1f)$$

Note que,  $x_{ij}$  e  $y_{ij}$  são duas variáveis do Problema (1), sendo  $x_{ij} = 1$  se o veículo percorre o nó de  $i$  para  $j$  e  $x_{ij} = 0$  caso contrário. A variável  $y_{ij}$  refere-se a carga transportada de  $i$  para  $j$ .  $Q$  é a carga máxima transportada e  $D_i$  é a demanda do nó  $i$ . As equações do Problema (1) são descritas a seguir:

- (1a) refere-se a função objetivo, onde minimiza-se a distância percorrida pelos veículos;
- (1b) garante que cada cliente seja visitado por um único veículo;
- (1c) assegura que cada veículo que chegue em um nó terá de deixá-lo;



- (1d) indica que a demanda do cliente seja atendida;
- (1e) estabelece que a capacidade do veículo não seja excedida;
- (1f) nota que  $x_{ij}$  é uma variável binária.

O Problema (1) é a forma geral do Problema de Roteamento de Veículos Capacitado *clássico*. Nela, os custos  $c_{ij}$  podem descrever diversos elementos da modelagem do problema, como distância percorrida ou tempo, entre outros.

Outra abordagem discutida neste trabalho é o Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo, ou *Vehicle Routing Problem with Time Windows – VRPTW*, que é uma extensão do PRVC com a restrição adicional de que a entrega (ou coleta) no cliente  $i$  deve ser realizada no intervalo de tempo  $[a_i, b_i]$ , chamado de *janela de tempo*. O instante em que o veículo deixa o depósito, o tempo de viagem  $t_{ij}$ , para cada arco  $(i, j) \in A$  e o tempo de serviço  $s_i$  para cada cliente é dado. O serviço de cada cliente precisa começar e terminar dentro da janela de tempo (vide Toth e Vigo [2002]).

O PRV com *Backhauls – PRVB*, é outra extensão do PRVC onde o conjunto de clientes é dividido em dois subconjuntos. O primeiro subconjunto  $L$ , contém  $n$  clientes *linehaul*, cada um requer uma dada quantidade de produtos a serem entregues. O segundo subconjunto  $B$ , possui  $m$  clientes *backhaul*, onde uma dada quantidade de produtos devem ser recolhidos. Ainda, segundo Toth e Vigo [2002], sempre que uma rota serve os dois tipos de clientes, todos os clientes *linehaul* tem de ser servidos antes de qualquer cliente *backhaul*.

Outras variações serão descritas ao longo do trabalho.

### 3. Green Vehicle Routing Problem

A nomenclatura *Green Vehicle Routing Problem – GVRP* é adotada para Problemas de Roteamento de Veículos que incluem em sua formulação matemática questões ambientais, como minimizar o consumo de combustível, emissão de GEE emitidos por veículos automotores, uso de combustíveis alternativos, estudo sobre a velocidade do veículo e emissão de poluentes, entre outros.

Segundo Palmer [2007], a emissão de CO<sub>2</sub> por veículos deriva de muitos fatores, como idade, tamanho do motor, velocidade, tipo de combustível, peso, estado de manutenção e a maneira no qual é dirigido. A emissão aumenta em congestionamentos e tráfego lento, e é diretamente proporcional ao consumo de combustível. No caso do diesel, emite-se 2,82kg CO<sub>2</sub>/litro. Assim, neste trabalho é apresentada a relação entre consumo de combustível e emissão de CO<sub>2</sub>, e como realizar o cálculo da emissão. As instâncias minimizam separadamente distância, tempo e CO<sub>2</sub>, através de planilha eletrônica (no caso Excel®). A seguir, alguns trabalhos relevantes sobre GVRP e emissão de CO<sub>2</sub> serão discutidos.

No trabalho de Bektaş e Laporte [2011], os autores apresentam uma formulação para o PRV, no caso *Pollution-Routing Problem (PRP)*, onde a função objetivo minimiza a distância percorrida, carga do veículo, energia produzida, emissão de CO<sub>2</sub>, combustível consumido e custo do motorista. O modelo proposto é aplicado em instâncias com e sem janela de tempo, fazendo uso do software CPLEX 12.1. Na análise dos autores, o custo de emissão de CO<sub>2</sub> impacta menos do que o custo do combustível e do motorista. Minimizar a distância não necessariamente implica em redução do custo de combustível e motorista.

Em Salimifard e Raeesi [2014] otimiza-se a emissão de CO<sub>2</sub> para uma frota de veículos bicombustível, que opera com combustíveis fóssil e alternativo, visando não somente reduzir o consumo, mas também otimizar a utilização do combustível alternativo. A análise envolveu um estudo de caso iraniano, uso do software CPLEX 12.3, e os resultados indicam uma redução de 27,38% de emissão de CO<sub>2</sub> e de 18,76% no custo total quando comparado ao VRP Capacitado, usando apenas combustível fóssil.



Em Ubeda et al. [2011] estuda-se uma aplicação de PRV Capacitado (ou PRVC) e PRV Backhauling (PRVB). Os autores consideram as seguintes características para o problema: tamanho da frota conhecida, frota homogênea, demanda determinística, depósito único, fluxo de rede conhecido, com o objetivo de minimizar as distâncias. No cálculo da função objetivo, multiplica-se a distância pelo fator de emissão de CO<sub>2</sub> e a demanda de cada nó visitado. As distâncias são estimadas usando a distância Euclidiana entre nós e são consideradas simétricas. Os autores analisaram um estudo de caso, da empresa Eroski, em uma região da Espanha. Aplicaram o método heurístico de Mole e Jameson para o PRVC e o algoritmo de *nearest neighbour insertion* para o PRVB, desenvolvidos em linguagem numérica Matlab 7.3. Para o PRVC obteve-se uma redução de 11 rotas e 13,18% das distâncias percorridas; para o PRVB houve uma redução de 27 rotas e 15,46% de quilômetros dirigidos.

O trabalho de Pradenas et al. [2013] também aborda um PRVB, porém com janela de tempo. Neste caso, há a formulação de uma função objetivo que busca minimizar a energia do veículo, ou seja, a emissão de CO<sub>2</sub>, carga transportada e distância. Para a resolução, usa-se a implementação da metaheurística *Scatter Search (SS)*, aplicada a instâncias da literatura.

Em Jabali et al. [2012] são analisados, para tempos de viagens pré-determinados, o custo de emissão de CO<sub>2</sub>, o custo de consumo de combustível e o custo do motorista. O problema é nomeado como *Emissions-based Time-Dependent Vehicle Routing Problem (E-TDVRP)*. Há a descrição do cálculo de emissão do poluente estudado com a velocidade do veículo e demais custos. Aplica-se a heurística de Busca Tabu para encontrar a solução do problema em instâncias testes de Augerat et al. [1998]. Entre os resultados apresentados, 98,6% do custo representa o custo do motorista e de combustível e, apenas 1,4% de emissão de CO<sub>2</sub>, o que representa um impacto econômico baixo em relação aos demais custos. Porém, quando fixada a velocidade do veículo em 85 km/h, a emissão do poluente é a mais baixa.

Uma formulação semelhante para o cálculo do poluente usada por Jabali et al. [2012]; Figliozzi [2010] também desenvolve uma função custo para o modelo TDVRP, aplicada para diferentes níveis de congestionamento usando um método heurístico (GRASP) e os testa nas instâncias de Solomon<sup>1</sup>.

No trabalho de Xiao et al. [2012] desenvolve-se uma equação linear para estimar o consumo de combustível por distância percorrida dependente do peso da carga transportada — *Fuel Consumption Rate (FCR)* — para o Problema de Roteamento de Veículos Capacidade (PRVC). Os autores usam a heurística *Simulated Annealing* para resolver instâncias de médio e grande porte. Comparam os resultados com o PRVC e PRVC com o cálculo do FCR na função objetivo, obtendo um ganho de aproximadamente 5% com o uso do FCR. Este modelo, PRVC com FCR, foi usado por Santos et al. [2016] em um estudo de caso para a coleta de material reciclável porta-a-porta, na cidade de Sorocaba – SP.

Em Adiba et al. [2013] estuda-se o PRVC minimizando a emissão de CO<sub>2</sub>. O cálculo da emissão do poluente é uma função linear similar aquela desenvolvida por Xiao et al. [2012]. No PRVC há a inclusão de uma restrição de tempo de viagem, que não pode ser violada. Aplicou-se uma metaheurística híbrida: *Ant Colony System* junto com *Large Neighborhood Search*, implementada em linguagem compilável C++ e aplicou-se em *benchmark* da literatura<sup>2</sup>.

No trabalho de Kwon et al. [2013] busca-se minimizar a emissão de carbono para um PRV com frota heterogênea (*Carbon emission based heterogeneous vehicle routing problem – C-HVRP*). A função objetivo calcula o custo operacional do veículo por unidade de distância vezes a distância percorrida somado ao custo de emissão, cujo cálculo é baseado na função de taxa de consumo de combustível e peso do veículo dada por Xiao et al. [2012]. Os autores desenvolveram uma metaheurística híbrida baseada na Busca Tabu e aplicou em *benchmark* de Taillard [1999].

<sup>1</sup><http://web.cba.neu.edu/~msolomon/home.htm>, acesso em 2017-03-27

<sup>2</sup><http://www.bernabe.dorronsoro.es/vrp/>, acesso em 2017-03-27



Outros trabalhos, como os de Demir et al. [2014]; Eksioglu et al. [2009]; Lin et al. [2014]; Sbihi e Eglese [2007]; Srivastava [2007] apresentam uma revisão da literatura sobre GVRP, incluindo outras abordagens além destas listadas acima.

Neste estudo sobre GVRP focamos sobre problemas que minimizam consumo de combustível e emissão de GEE, em particular, CO<sub>2</sub>. A Tabela 1 apresenta um resumo dos artigos aqui abordados. Note que, TW denota *Time Windows*, em português, Janela de Tempo.

Tabela 1: Resumo dos artigos.

Artigo	Função Objetivo				
	Combustível	CO <sub>2</sub>	Variação do PRV	Estudo de caso	Instâncias
Adiba et al. [2013]		X	PRVC e TW		X
Bektaş e Laporte [2011]	X		PRP com e sem TW		X
Figliozzi [2010]		X	TWVRP		X
Jabali et al. [2012]	X	X	TDVRP		X
Kwon et al. [2013]		X	PRVC		X
Palmer [2007]		X	PRV		X
Pradenas et al. [2013]	X	X	PRVB e TW		X
Salimifard e Raeesi [2014]		X	PRVC	X	
Ubeda et al. [2011]		X	PRVC e PRVB	X	
Xiao et al. [2012]	X		PRVC	X	

#### 4. Considerações Finais

Os trabalhos aqui apresentados ilustram a importância do estudo de GVRP para a diminuição de emissão de GEE, um problema atual e que ainda encontra resistência das autoridades mundiais no desenvolvimento de mecanismos de redução.

O uso de combustíveis alternativos vêm sendo estudado em veículos bicompostíveis. Porém um veículo totalmente abastecido com combustível alternativo pode ter menor potência do que aquele que faz uso de combustível fóssil.

Embora haja um grande esforço da comunidade científica em produzir veículos autônômos e movidos a energia limpa, ainda são necessários estudos sobre a autonomia motora, ciclo de vida da energia gerada, seu custo, descarte apropriado de baterias e demais componentes, que eventualmente podem poluir os solos e águas subterrâneas.

Assim, o uso dos PRV em suas várias formas e aplicações — em particular na redução do consumo de combustível — torna-se uma ferramenta de implantação relativamente simples e barata, com potencial de redução real na emissão de GEE. Embora em geral o objetivo de um PRV seja o de minimizar a distância percorrida, como citado por Bektaş e Laporte [2011] a menor distância **não** implica em menor consumo de combustível ou menor emissão de CO<sub>2</sub>. Como apresentado em Santos et al. [2016], em um estudo de caso de coleta seletiva, o problema resolvido de forma clássica apresenta uma solução diferente quando comparado ao GVRP. No segundo caso, há um ganho ambiental de 700kg de redução de emissões de CO<sub>2</sub> por ano.

Uma proposta de trabalho futuro, pensando em veículos movidos a combustíveis fósseis, é a elaboração de rotas onde são inclusas nas distâncias as inclinações das vias (aclives e declives), minimizando a emissão de GEE.

#### Referências

- Adiba, E. B. E. I., Elhassania, M., e Ahemd, E. H. (2013). A hibrid ant colony system for green capacitated vehicle routing problem in sustainbale transport. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 54(2):198–208.
- Arenales, M. N., Armentano, V., Morabito, R., e Yanasse, H. (2007). *Pesquisa Operacional*. Elsevier.





- Augerat, P., Belenguer, J. M., Benavent, E., Corberán, A., e Naddef, D. (1998). Separating capacity constraints in the cvrp using tabu search. *European Journal of Operational Research*, 106:546–557.
- Bektaş, T. e Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8):1232 – 1250. ISSN 0191-2615. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019126151100018X>.
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Mierzwa, J. C., de Barros, M. T. L., Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., e Eiger, S. (2005). *Introdução à Engenharia Ambiental*. Pearson Prentice Hall, second edition.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Emissão veicular. URL <http://veicular.cetesb.sp.gov.br>.
- Demir, E., Bektaş, T., e Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 237(3):775 – 793. ISSN 0377-2217. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713010175>.
- e Engenharia Ambiental, I. E. B. . G. (2013). Inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa do município de são paulo de 2003 a 2009 com atualizações para 2010 e 2011 nos setores energia e resíduos. URL [http://www.prefeitura.gov.br/cidade/secretaria/upload/meio\\_ambiente/arquivos/CT\\_INVEMI.PDF](http://www.prefeitura.gov.br/cidade/secretaria/upload/meio_ambiente/arquivos/CT_INVEMI.PDF).
- Eksioglu, B., Vural, A. V., e Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: a taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57:1472–1483.
- Figliozzi, M. (2010). Vehicle routing problem for emissions minimization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2197:1–7.
- Fischedick, M., Roy, J., Abdel-Aziz, A., Acquaye, A., Allwood, J. M., Ceron, J.-P., Geng, Y., Kheshgi, H., Lanza, A., Perczyk, D., Price, L., Santalla, E., Sheinbaum, C., e Tanaka, K. (2014). Industry. In Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlomer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., e Minx, J., editors, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jabali, O., Woensel, T. V., e de Kok, A. G. (2012). Analysis of travel times and co2 emissions in time-dependent vehicle routing. *Production and Operations Management*, 21(6):1060–1074. ISSN 1937-5956. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1937-5956.2012.01338.x>.
- Kwon, Y.-J., Choi, Y.-J., e Lee, D.-H. (2013). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23:81–89. ISSN 1361-9209. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920913000643>.
- Lin, C., Choy, K., Ho, G., Chung, S., e Lam, H. (2014). Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4, Part 1): 1118 – 1138. ISSN 0957-4174. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095741741300609X>.



- Nações Unidas (1998). Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. URL <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.
- Palmer, A. (2007). *The Development of an Integrated Routing and Carbon Dioxide Emissions Model for Goods Vehicles*. PhD thesis, Cranfield University.
- Pradenas, L., Oportus, B., e Parada, V. (2013). Mitigation of greenhouse gas emissions in vehicle routing problems with backhauling. *Expert Systems with Applications*, 40(8): 2985 – 2991. ISSN 0957-4174. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417412012559>.
- Salimifard, K. e Raeesi, R. (2014). A green routing problem: optimising CO<sub>2</sub> emissions and costs from a bi-fuel vehicle fleet. *International Journal of Advanced Operations Management*, 6(1): 27–57.
- Santos, G. T., Cantão, L. A. P., e Cantão, R. F. (2016). Vehicle routing problem with fuel consumption minimization: a case study. In Maturana, S., editor, *Proceedings of the XVIII Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, CLAIO 2016*, p. 802–809. ISBN: 978-956-9892-00-4.
- Sbihi, A. e Eglese, R. W. (2007). The relationship between vehicle routing and scheduling and green logistics - a literature survey. Technical report, The Department of Management Science.
- Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D., Meza, M. J. F., Fulton, L., Kobayashi, S., Lah, O., McKinnon, A., Newman, P., Ouyang, M., Schauer, J. J., Sperling, D., e Tiwari, G. (2014). Transport. In Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlomer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., e Minx, J., editors, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., Ravindranath, N. H., Rice, C. W., Abad, C. R., Romanovskaya, A., Sperling, F., e Tubiello, F. (2014). Agriculture, forestry and other land use (afolu). In Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlomer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., e Minx, J., editors, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1):53–80. ISSN 1468-2370. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>.
- Taillard, E. D. (1999). A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet vrp. *RAIRO Recherche Opérationnelle*, 33(1):1–14.
- Toth, P. e Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics. URL <http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9780898718515>.
- Ubeda, S., Arcelus, F. J., e Faulin, J. (2011). Green logistics at eroski: A case study. *International Journal of Production Economics*, 131(1):44–51. ISSN 0925-5273. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552731000174X>. Innsbruck 2008.





United States Environmental Protection Agency. Greenhouse gas emissions. URL <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>.

Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., e Xu, Y. (2012). Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 39(7): 1419 – 1431. ISSN 0305-0548. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811002450>.