

Coleta Seletiva e o Problema de Roteamento de Veículos Green – Estudo de Caso

Gregory Tonin Santos and Luiza Amalia Pinto Cantão

Univ. Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP
gregorytonin@hotmail.com, luiza@sorocaba.unesp.br

Resumo Neste trabalho apresentamos um modelo de Problema de Roteamento de Veículos Green voltado à redução de consumo de combustível e subsequente redução nas emissões de gases de efeito estufa. Um estudo de caso deste modelo é construído baseado nos dados fornecidos pela cooperativa de coleta seletiva CORESO, da cidade de Sorocaba, SP. A solução do modelo é obtida através da metaheurística *Ant Colony System* associada a Busca Tabu. Os resultados assim obtidos são comparados com os resultados exatos via um software comercial (CPLEX).

Palavras Chaves: Problema de Roteamento de Veículos Green; Taxa de Consumo de Combustível; Otimização por Colônia de Formigas.

1 Introdução

Os constantes processos de industrialização em conjunto com o crescimento econômico e populacional geraram, no decorrer dos anos, um aumento na produção de resíduos sólidos com uma sensível modificação em sua composição, indo de um predomínio de fração orgânica para outra com degradação mais lenta. Neste cenário a reciclagem de materiais torna-se uma prática indispensável para mitigação dos impactos negativos relacionados a este aumento [1].

A reciclagem consiste em procedimentos capazes de reutilizar materiais descartados, recolocando-os no ciclo produtivo. Esta alternativa é vantajosa do ponto de vista ambiental e social, pois reduz a necessidade de utilização de recursos naturais e gera empregos. Esta técnica se inicia na separação dos materiais nas residências seguido de sua destinação para cooperativas, catadores ou empresas de recicladores para aplicação dos processos de reciclagem para cada tipo de material coletado e reinserção no ciclo produtivo.

Desta forma, cooperativas de reciclagem tornam-se agentes importantes deste processo à medida em que permitem o aumento da vida útil de materiais através da coleta seletiva, separação e destinação para indústrias especializadas, auxiliando na logística reversa de produtos e recuperando os materiais utilizados. Infelizmente, a participação destas cooperativas na coleta seletiva vem diminuindo sistematicamente [2].

Esta queda de participação das cooperativas deve-se, possivelmente, a falta de investimentos financeiros e a ineficiência da coleta seletiva, visto que em muitos casos possuem poucos veículos para transporte dos materiais coletados e há

a necessidade de passar em cada residência para coleta [3]. Assim, ferramentas que visam melhorar eficiência das rotas executadas por caminhões são importantes para gestão destas cooperativas, reduzindo tempo de coleta ou consumo de combustível, economizando recursos neste processo.

Além da questão puramente econômica, temos um efeito ambiental indireto, porém benéfico, da redução no consumo de combustíveis: uma proporcional redução nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), metano e o óxido nitroso. Os GEE potencializam o efeito estufa [4], aumentando a temperatura atmosférica média e podendo ocasionar mudanças climáticas de impacto planetário.

Assim, um fator que pode ser estudado de forma a minimizar os custos relacionados ao transporte é o consumo de combustível. Segundo [5], para um caso real de uma transportadora em Shanghai, China, o custo com combustível representava, aproximadamente, 67,5% do custo total do transporte; desta forma apenas a redução do consumo com combustível acarretou em considerável minimização de gastos totais.

Uma das principais formas sistemáticas de se abordar este questão de minimização de consumo de combustíveis e emissão de GEE é através dos chamados Problemas de Roteamento de Veículos (PRV), (*Vehicle Routing Problems (VRP)*, no original em Inglês). Estes consistem de um problema de programação inteira que modela numa frota de veículos que deve satisfazer as demandas de uma série de clientes pré-estabelecidos, atendendo a todos os clientes de acordo com restrições específicas [6]. Na literatura, os PRV com enfoque ambiental são denominados Problemas de Roteamento de Veículos Green, (*Green Vehicle Routing Problems (GVRP)*, do original em Inglês).

A metaheurística implementada para resolução do GVRP estudado, e com vasta aplicação em problemas da literatura, é a Otimização por Colônia de Formigas, em Inglês, *Ant Colony System (ACS)*, desenvolvido por Dorigo e Gambardella (1997), base para o presente trabalho.

2 Formulação Matemática

2.1 Problemas de Roteamento de Veículos com Objetivo de Minimização do Consumo de Combustível

O modelo matemático utilizado é baseado em [5], por ser um modelo bem detalhado e inovador [7]. Nele a velocidade é considerada constante. O principal fator determinante para estimativa do consumo de combustível é o peso total transportado. Adaptamos este modelo para o estudo de caso da cooperativa de materiais recicláveis CORESO, localizado na cidade de Sorocaba – SP, utilizando a metaheurística ACS. O cenário de estudo referente ao teste do GVRP é baseado em [8] e a resolução do modelo matemático proposto por [5].

Usaremos aqui a notação de [9], que estabelece o Problema de Roteamento de Veículos clássico retratado por um grafo orientado completo $G = (N, E)$, onde $N = C \cup \{0, n + 1\}$, $C = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós (associado aos clientes), e

0 e $n + 1$ são os nós que representam o depósito. O conjunto $E = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j, i \neq n + 1, j \neq 0\}$ são os arcos que ligam os nós, sendo que nenhum nó termina em 0 e começa no nó $n + 1$, necessariamente todos começam em 0 e terminam em $n + 1$ (depósito). Os custos estão associados com os arcos $(i, j) \in E$ e cada cliente i está associado a uma demanda D_i .

O primeiro passo para descrever o modelo são os pontos de coleta, sua localização em coordenadas geográficas, suas respectivas demandas e as distâncias entre eles. O próximo passo para o entendimento do modelo é o desenvolvimento do FCR (*Fuel Consumption Rate*), valor determinado a partir da função inversa da autonomia dos veículos, ou seja, quantos litros são necessários para o veículo percorrer um quilômetro, dependendo do peso da carga. Utilizamos uma função linear para descrever o FCR do peso coletado de materiais recicláveis em cada ponto, assim como proposto por [5] e apresentado na Equação (1).

$$\rho_{ij} = \rho(Q_{ij}) = \rho_0 + \alpha Q_{ij}, \quad \alpha = \frac{\rho^* - \rho_0}{Q}. \quad (1)$$

Note que ρ_0 e ρ^* são os parâmetros do FCR do caminhão vazio e carregado, respectivamente. A variável Q_{ij} corresponde à quantidade carregada pelo caminhão do nó i para o nó j , $i, j \in N$. Q é a capacidade total de carga do caminhão.

De forma geral as equações do problema de roteamento de veículos estão restritas a alguns fatores, como (1) a carga transportada não pode ultrapassar a capacidade total do veículo; (2) cada cliente é atendido apenas uma vez e (3) as rotas devem iniciar e terminar no nó 0 (depósito).

Definindo c_0 como preço do combustível, d_{ij} a distância do nó i ao nó j , D_i é a demanda do nó i , F o custo fixo para transporte, y_{ij} o peso que um caminhão transporta de i para j e x_{ij} a variável binária de decisão (se $x_{ij} = 1$ o veículo percorre os nós i até j ; caso contrário $x_{ij} = 0$), a formulação do GVRP baseado em [5] com objetivo de minimização de consumo de combustível (Problema (2)), fica:

$$\min \sum_{j=1}^n Fx_{0j} + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_0 d_{ij} (\rho_{ij} x_{ij} + \alpha y_{ij}) \quad (2a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=0}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2b)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} - \sum_{j=0}^n x_{ji} = 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2c)$$

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} - \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ji} = D_i \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2d)$$

$$y_{ij} \leq Qx_{ij} \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad (2e)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad (2f)$$

Cada restrição de (2) tem uma finalidade: (2a) é a função objetivo (minimização do custo de combustível); (2b) indica que cada cliente só pode ser visitado por um único veículo; (2c) estabelece que o veículo deve visitar um cliente (nó) e sair; (2d) representa o aumento da carga após o veículo visitar um nó, sendo que o valor é igual à demanda do nó visitado; (2e) determina que as cargas não podem ultrapassar a capacidade do veículo e (2f) é a variável binária de decisão.

Nosso modelo apresenta algumas diferenças em relação a [5]:

- Na Equação (2d), invertemos os somatórios, pois o veículo deixa o depósito vazio e retorna cheio, coletando materiais durante a execução do percurso; para o autor, a formulação é desenvolvida baseada em caminhões de distribuição de água que saem carregados e retornam vazios ao depósito;
- Também simplificamos a função objetivo, Equação (2a), pois desconsideramos o seu custo fixo e focamos somente no custo associado ao consumo de combustível, sendo ρ_{ij} o FCR em cada trecho da rota de acordo com a Equação (1).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_0 \rho_{ij} d_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

A diferença entre a Equação (2a) e a Equação (3) é de que a primeira calcula o custo para uma frota de veículos homogêneos, enquanto a outra realiza o cálculo do custo de um único veículo.

2.2 Ant Colony System (ACS)

O ACS pode ser aplicado em problemas que incluem grafos, onde o nó inicial (depósito) é o ponto de partida para o desenvolvimento de um circuito fechado, percorrendo todos os nós e retornando ao inicial, respeitando certas restrições. As formulações do ACS estão expostas a seguir, como descritas por [10] e [11].

A Equação (4) representa a probabilidade de escolha (p_{ij}^k) da formiga k selecionar um novo nó j para incluir na solução

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [v_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [v_{il}]^\beta}, & \text{se } j \in N_i^k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

onde $\tau_{ij}(t)$ é a quantidade de feromônio presente na trilha (i, j) no tempo t , $v_{ij} = 1/d_{ij}$ é a visibilidade do nó j que está relacionado ao percurso do nó i , representando a atratividade da formiga em percorrer esse trecho, α e β são parâmetros para determinar a influência do feromônio e da informação heurística, k , o índice de cada formiga e N_i^k , a vizinhança viável da formiga k , sendo este o conjunto de nós ainda não visitados pela formiga k .

O feromônio $\tau_{ij}(t)$ associado com a aresta (i, j) atua de duas formas:

1. Na evaporação, evitando o acúmulo infinito e favorecendo o esquecimento de decisões ruins realizadas;

2. No depósito de feromônio de todas as formigas que passaram sobre a aresta (i, j) .

Após a realização das rotas pelas formigas há a atualização do feromônio. A primeira etapa é a estimativa da quantidade de feromônio depositado sobre as arestas (i, j) , representado na Equação (5)

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L^k(t), & \text{se } (i, j) \in S^k(t) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (5)$$

sendo $\Delta\tau_{ij}^k$ a quantidade de feromônio depositado pela formiga k sobre a aresta (i, j) , Q a quantidade de feromônio secretado por uma formiga em cada interação, L_k a distância percorrida pela formiga k e S_k o conjunto de nós que são percorridos pela formiga k para construção da solução.

Por fim, a Equação (6) representa a atualização do feromônio τ_{ij} associado à aresta (i, j) .

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (6)$$

onde a primeira parcela representa a evaporação de feromônio, com $\rho \in [0, 1]$ (taxa de evaporação) e a segunda parcela representa o seu depósito. O critério de parada da metaheurística é um número pré-definido de iterações ou a estagnação da solução.

Também implementamos a metaheurística Busca Tabu (BT), fornecendo uma memória à metodologia, que a impede de retornar a uma solução já desenvolvida [12]. Como apresentado por [13], soluções baseadas na metaheurística ACS associadas com a BT apresentam resultados competitivos em comparação com algoritmos renomados da literatura.

A metaheurística ACS desenvolvida neste trabalho baseou-se em [14].

3 Metodologia

3.1 Materiais

Os softwares utilizados para aplicação do modelo foram o Matlab versão R2010a para implementação dos algoritmos, Planilha Eletrônica Excel® versão 1610 para tabulação dos dados da cooperativa, ArcGis 10.3 para o georreferenciamento dos pontos de coleta e Google Earth Pro para obtenção das coordenadas geográficas dos pontos de coleta

O algoritmo, os modelos teste e estudo de caso foram implementados e compilados em um computador com processador Intel i7, 2ª geração, 3.4 GHz, com 8 GB de memória RAM e sistema operacional Microsoft Windows 7®.

3.2 Métodos

Primeiramente formulamos o GVRP com o objetivo de redução do consumo de combustível, de acordo com o modelo proposto por [5] e incorporando as

alterações já discutidas. Sua solução deu-se através da metaheurística ACS implementada no software Matlab.

Desenvolvido o algoritmo, buscou ajustar os parâmetros do ACS de acordo com as instâncias utilizadas por [15] e propostas por [16]. Para ajuste dos parâmetros utilizamos três instâncias de [16]: M-n101-k10, M-n121-k7 e a M-n151-k12, onde n representa a quantidade de nós e k a quantidade inicial de formigas. Para analisar a eficiência e funcionalidade do GVRP implementado neste trabalho com um modelo da literatura, utilizou-se as instâncias e dados de [8].

Visando identificar os parâmetros que melhor se adequam ao modelo desenvolvido comparou-se com os propostos por [15,14], o melhor resultado concluído por [17] e com três parâmetros ajustados empiricamente neste trabalho. Os três parâmetros foram definidos como A, B e C, sendo A ($\alpha = 0,5$; $\beta = 6$; $\rho = 0,3$; $q_0 = 40$), B ($\alpha = 0,3$; $\beta = 6$; $\rho = 0,3$; $q_0 = 60$) e C ($\alpha = 0,3$; $\beta = 6$; $\rho = 0,28$; $q_0 = 60$).

Para todos os cenários e parâmetros, até mesmo para o estudo de caso, definimos 3000 iterações como critério de parada.

O cálculo das distâncias entre os pontos de coleta e o depósito para o modelo teste e para o estudo de caso foi através da implementação, em ambiente Matlab, da distância euclidiana [18], que considera a curvatura do planeta.

3.3 Estudo de Caso

Para o estudo de caso o primeiro passo foi o levantamento de dados operacionais junto à cooperativa de materiais recicláveis CORESO da cidade de Sorocaba – SP, através de reuniões periódicas (uma a cada dois meses), identificando as ruas em que a cooperativa realiza as coletas, o cronograma diário de trabalho dos caminhões para cada semana, o peso total mensal coletado de material e discussão sobre a possibilidade de aplicação dos resultados finais do presente trabalho no seu cronograma, elaborando um novo sequenciamento a ser seguido e executado.

A cooperativa CORESO realiza a coleta de materiais recicláveis, principalmente na zona leste de Sorocaba, atendendo um total de 230 ruas (nós) de segunda à sexta-feira e, aproximadamente, 9000 pontos de coleta, entre casas (coleta de porta em porta) e geradores coletivos. Para a implementação do modelo, levantamos as coordenadas geográficas de todas as ruas em que são realizadas as coletas, com auxílio do software Google Earth Pro.

Implementamos os dados de entrada e os melhores parâmetros estudados do ACS (A e C) no algoritmo desenvolvido para as ruas de cada dia da semana (segunda a sexta-feira).

A cooperativa possui dois caminhões iguais com capacidade de 4.000 quilogramas, assim para o estudo de caso consideramos uma frota homogênea para o desenvolvimento das rotas. Para estimar a emissão de poluentes levantamos as características relacionadas com a emissão de GEE. As quantidades estimadas destes poluentes foram obtidas através de [19]. O veículo utilizado pela cooperativa não aparece na tabela de etiquetagem de veículos do INMETRO, portanto

consideramos aquele com características semelhantes, o Citroën Jumper motor 2.3 16V.

De acordo com informações fornecidas pela cooperativa, os veículos possuem consumo médio de 7,5 km/L, assim adotamos consumo de 9 km/L e 6 km/L para o veículo vazio e cheio, respectivamente; estes valores foram considerados aceitáveis por parte da administração. Com isso, para o cálculo do FCR do modelo proposto, temos $\rho_0 = 1/9$ L/km = 0.1111 L/km e $\rho^* = 1/6$ L/km = 0.1667 L/km. De acordo com a Equação (1), temos que $\alpha \cong 1 \times 10^{-5}$, resultando na equação do FCR: $\rho = 1 \times 10^{-5}Q + 0,111$.

Para cálculo do custo das rotas associados com o combustível, o preço considerado foi de R\$ 2,999 para o Diesel; de acordo com a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustível) no dia 01/03/2017 para a Petrobrás Distribuidora S.A. na cidade de Sorocaba – SP [20].

Finalmente, desenvolvemos a representação espacial das rotas, baseada nas soluções calculadas e nos pontos de coleta georreferenciados. Para isso utilizamos as bases cartográficas do município de Sorocaba em escala referência de 1:10.000, do Estado de São Paulo em escala de 1:50.000 e das unidades federativas do Brasil em escala de 1:2.500.000 [21].

Após o desenvolvimento das melhores rotas, ou seja, as que consomem menos combustível (emitindo menos poluente) elaboramos um itinerário para a cooperativa aplicar na execução da coleta de materiais recicláveis, e através de reuniões apresentamos nossos resultados e explanamos sobre o sequenciamento desenvolvido para o motorista e administração.

4 Resultados e Discussão

4.1 Instâncias e Testes

Para estudo dos melhores parâmetros para o modelo, realizamos alguns testes em diferentes cenários, nos baseando em parâmetros da literatura. A Tabela 1 resume as soluções obtidas com os parâmetros estabelecidos para cada instância da literatura. As colunas apresentam, na ordem, os parâmetros que são aplicados na metaheurística do ACS, as instâncias utilizadas, a solução apresentada e o erro percentual em relação à melhor solução obtida para cada instância. Para aplicação do modelo, foram inicializadas 10 formigas para a instância M-n101-k10, para a M-n151-k12 foram 12 formigas, para M-n121-k7 foram 7 formigas e para o caso de [8], 8 formigas.

O pior parâmetro analisado é o proposto por [15], como visto na Tabela 1, provavelmente por ser um dos primeiros trabalhos a abordar o tema. Outro ponto interessante é que o modelo proposto por [14] também trata sobre a aplicação da metaheurística ACS para um GVRP, porém o parâmetro deste autor apresentou a maior diferença em relação ao modelo exato de [8]; esta divergência deve-se possivelmente ao fato do cenário utilizado por este autor ser diferente ao de [8] e por este tratar de um ACS híbrido baseado na metaheurística LNS, que difere do modelo desenvolvido no presente trabalho.

Tabela 1. Solução das instâncias de acordo com cada parâmetro.

Parâmetros	Instâncias	Resultado	Diferença (%)
[15]	M-n101-k10	1119,13	28,46
	M-n151-k12	1513,50	46,53
	M-n121-k7	1512,31	46,26
	[8]	77,16	3,58
[14]	M-n101-k10	1103,43	26,67
	M-n151-k12	1513,50	46,53
	M-n121-k7	1523,81	47,37
	[8]	77,79	4,43
[17]	M-n101-k10	1115,08	28,00
	M-n151-k12	1510,16	46,20
	M-n121-k7	1389,15	34,35
	[8]	77,16	3,58
A	M-n101-k10	937,98	7,67
	M-n151-k12	1257,64	21,76
	M-n121-k7	1371,96	32,68
	[8]	75,52	1,38
B	M-n101-k10	1067,43	22,53
	M-n151-k12	1121,20	8,55
	M-n121-k7	1152,53	11,46
	[8]	76,65	2,90
C	M-n101-k10	985,82	13,16
	M-n151-k12	1164,65	12,75
	M-n121-k7	1062,06	2,71
	[8]	74,90	0,55

A Tabela 2 apresenta as diferenças entre o modelo com resolução exata com o software GAMS 24.3 e com a metaheurística de acordo com o cenário de [8], sendo utilizados os três parâmetros ajustados empiricamente na aplicação do ACS, pois cada parâmetro se ajusta melhor em cada dia. O custo total da rota para o modelo exato é de R\$ 74,49 e o tempo computacional necessário para execução desta solução foi de 7199,82 segundos.

Tabela 2. Diferenças do custo da rota e tempo computacional para as formulações exata e com ACS

	Custo da Rota (R\$)	Tempo Computacional (s)	Diferença (%) Custo da Rota	Diferença (%) tempo Computacional
ACS parâmetro A	75,52	22,83	1,38	-99,68
ACS parâmetro B	76,65	24,09	2,90	-99,67
ACS parâmetro C	74,90	23,47	0,55	-99,67

De acordo com a Tabela 2 é possível identificar o elevado ganho de tempo computacional que a utilização da metaheurística no modelo de GVRP apresenta, sendo necessário 0,32% do tempo para obtenção da solução final com diferença de 1,38% em relação ao modelo com resolução através do software GAMS e utilizando o parâmetro A.

4.2 CORESO

A Tabela 3 apresenta os custos para cada dia da semana desenvolvidos de acordo com o Problema (2) e utilizando dos três parâmetros ajustados no presente

trabalho para a solução encontrada através da metaheurística ACS. Os valores em negrito são os que apresentam os menores custos, sendo as melhores soluções para o estudo de caso proposto.

Tabela 3. Menores custos para cada dia da semana em relação aos três parâmetros ajustados empiricamente

	Parâmetros		
	A	B	C
Segunda	7,46	7,55	7,61
Terça	4,27	4,29	4,28
Quarta	4,11	4,11	4,11
Quinta	4,96	4,73	4,64
Sexta	4,00	4,09	4,09
Total	24,80	24,77	24,73

Para cada dia da semana adotamos a melhor solução (em negrito) em relação aos parâmetros testados. Ou seja, para segunda, terça, quarta e sexta-feira usamos a solução dada pelo parâmetro A e para quinta-feira, o parâmetro C. A Tabela 4 apresenta as rotas obtidas e a Figura 1 sua representação gráfica.

Tabela 4. Rotas para o estudo de caso com a carga coletada e o custo

Dias da semana	Rotas	Carga coletada (kg)	Custo (R\$)
Segunda	1 0-15-16-17-14-20-19-18-6-5-4-3-7-26-25-24-13-22-12-11-10-23-9-21-8-33-34-1-27-39-28-38-35-32-29-30-37-36-2-31-54-58-57-56-0	3986,20	5,77
	2 0-53-55-52-51-59-48-49-47-46-50-40-45-41-42-44-43-0	1326,00	1,69
Terça	3 0-29-30-31-41-28-25-26-24-27-23-22-21-7-48-44-46-43-5-2-3-4-6-9-13-14-10-11-15-12-16-42-45-47-0	3995,90	2,31
	4 0-40-20-19-17-18-35-32-33-1-36-37-39-34-38-8-0	1316,30	1,97
Quarta	5 0-43-44-45-37-36-35-34-40-39-28-41-42-29-27-30-26-24-25-23-1-4-22-5-6-8-7-21-20-9-10-11-16-15-14-17-0	3984,20	2,56
	6 0-19-13-18-12-31-32-3-2-33-38-0	1328,10	1,56
Quinta	7 0-33-29-26-28-27-18-11-7-10-9-6-4-3-2-1-12-5-8-15-14-13-21-22-17-25-24-23-38-0	3992,10	2,65
	8 0-16-19-20-37-36-34-35-30-32-31-0	1320,10	1,97
Sexta	9 0-35-25-26-28-30-31-14-33-34-29-40-39-37-36-13-10-4-12-11-1-9-6-8-5-7-3-2-0	3994,10	2,33
	10 0-15-22-19-20-17-21-18-38-23-16-27-24-0	1318,10	1,68

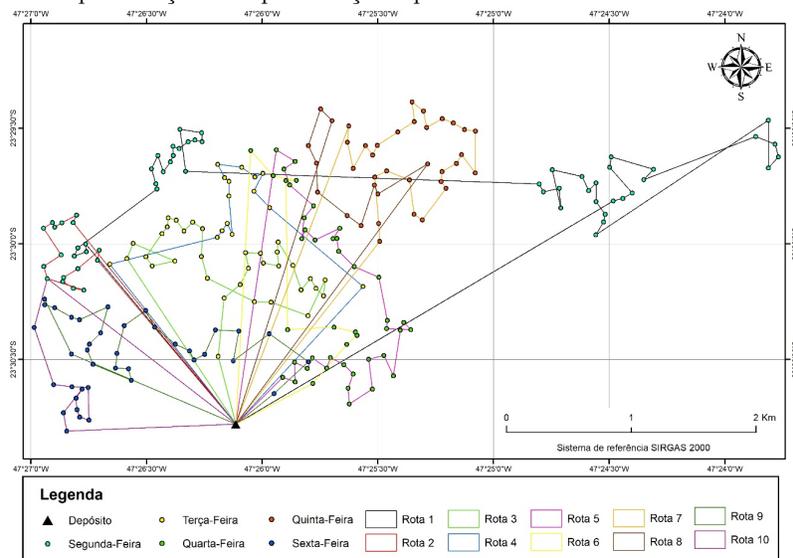
Elaboramos duas rotas para cada dia da semana, executadas por cada um dos dois veículos da cooperativa, atendendo todas as ruas e grandes geradores pré-definidos pela CORESO. O custo total das rotas semanais foi de R\$ 24,50. A Tabela 5 apresenta a emissão de gases do efeito estufa para cada dia da semana baseado nos dados de [19].

Após elaboração das rotas conforme proposto, apresentamos os resultados para a administração da cooperativa CORESO. Neste encontro também expu-

Tabela 5. Emissão de poluentes (em gramas) em cada dia da semana.

Dias da semana	CO ₂	NO _x	CO	NMHC
Segunda-feira	4910,487	5,396	0,878	0,373
Terça-feira	2813,470	3,092	0,503	0,214
Quarta-feira	2706,708	2,974	0,484	0,206
Quinta-feira	3051,932	3,354	0,545	0,232
Sexta-feira	2634,039	2,894	0,471	0,200
Total	16116,636	17,710	2,880	1,226

Figura 1. Aproximação da representação espacial de todas as rotas do estudo de caso.



semos todo o projeto e os resultados para os motoristas, pois a decisão final e a possibilidade de aplicação das rotas são de acordo com seu comprometimento. Eles aceitaram praticar o nosso modelo durante três semanas para avaliar a efetividade das rotas desenvolvidas. Durante este período imprevistos ocorridos com um dos motoristas afetaram as conclusões sobre as novas rotas, porém em alguns dias o nosso sequenciamento foi aplicado.

A cooperativa comunicou que houve aplicação das rotas durante este período de três semanas com algumas alterações, e o motorista informou que houve ligeira melhora em relação à distância percorrida, não indicando redução no consumo diretamente, mas que pode influenciar positivamente. Nas últimas conversas com a administração nos foi informado do interesse de aplicação das rotas em seu itinerário, porém no momento em que houver regularização com o caso do motorista, implementando progressivamente as rotas sugeridas.

5 Conclusão

A utilização da metaheurística ACS apresentou resultados satisfatórios e de grande potencial de aplicação em trabalhos de GVRP, de forma que em determinados cenários a solução com a metaheurística apresentou valores próximos ao ideal, com erro de 0,55%, com necessidade de 0,33% do tempo computacional para sua obtenção em relação ao modelo exato resolvido através do software GAMS. A etapa de ajustes dos parâmetros é fundamental e de extrema importância para obtenção dos resultados finais, sendo esta uma etapa que requer maior tempo de concentração, pois os ajustes são sensíveis, podendo interferir nas soluções do algoritmo.

O cálculo da emissão de gases do efeito estufa introduz a possibilidade de gerenciar e analisar a emissão destes gases gerados na etapa do transporte. Avaliando principalmente a emissão de gás carbônico (CO_2) abre-se um possível novo ramo para a cooperativa, o de créditos de carbono, baseado no protocolo de Quioto (1997). Além disso, o modelo proposto é uma ferramenta de suporte a gestão de um empreendimento que realiza a reciclagem, evitando que resíduos que ainda tenham potencial de reutilização de seu material sigam para disposição final em aterros sanitários, o qual tem associado uma série de impactos ambientais negativos.

Os benefícios do modelo estão relacionados à elaboração e planejamento de um cronograma fixo para a cooperativa, que além de auxiliar na administração fornecendo suporte para tomadas de decisões em casos de mudanças, como acréscimos ou decréscimos da quantidade de pontos de coleta, também promove facilidade de integração de novos motoristas, como na contratação de novos funcionários ou alterações de cargos, e permite que em mudanças, como aumento ou redução do preço do combustível, não alterem significativamente nosso itinerário proposto.

Referências

1. Souza, M.T.S.d., Paula, M.B.d., Souza-Pinto, H.d.: O papel das cooperativas de reciclagem nos canais reversos pós-consumo. *Revista de Administração de Empresas* **52** (04 2012) 246 – 262
2. CEMPRE (Compromisso empresarial para reciclagem): Ciclossoft 2016 (2016) <http://cempre.org.br/ciclossoft/id/8>, Acessado em 05/07/2017.
3. Ribeiro, H., Besen, G.R.: Panorama da coleta seletiva no brasil: desafios e perspectivas a partir de três estudos de caso. *INTERFACEHS – Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade* **2**(4) (2007)
4. Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J.G.L., Mierzwa, J.C., de Barros, M.T.L., Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., Eiger, S.: *Introdução à Engenharia Ambiental*. Second edn. Pearson Prentice Hall (2005)
5. Xiao, Y., Zhao, Q., Kaku, I., Xu, Y.: Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers and Operations Research* **39**(7) (2012) 1419 – 1431

6. Demir, E., Bektaş, T., Laporte, G.: A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal of Operational Research* **237**(3) (2014) 775 – 793
7. Lin, C., Choy, K., Ho, G., Chung, S., Lam, H.: Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications* **41**(4) (2014) 1118 – 1138
8. Santos, G.T., Cantão, L.A.P., Cantão, R.F.: Vehicle routing problem with fuel consumption minimization: a case study. In Maturana, S., ed.: *Proceedings of the XVIII Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, CLAIO 2016*. (2016) 802–809 ISBN: 978-956-9892-00-4.
9. Arenales, M.N., Armentano, V., Morabito, R., Yanasse, H.: *Pesquisa Operacional*. Elsevier (2007)
10. Dorigo, M., Gambardella, L.M.: Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *Trans. Evol. Comp* **1**(1) (April 1997) 53–66
11. Lopes, H.S., de Abreu Rodrigues, L.C., Steiner, M.T.A., eds.: *Otimização por Colônia de Formigas*. In: *Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional*. 1 edn. Omnipax, Curitiba, PR (2013)
12. Gomes, A.: Uma introdução ao a busca tabu, Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo (2009) <http://www.ime.usp.br/gold/cursos/2009/mac5758/AndreBuscaTabu.pdf>, Acessado em 20/06/2017.
13. De la Cruz, J.J., Paternina-Arboleda, C.D., Cantillo, V., Montoya-Torres, J.R.: A two-pheromone trail ant colony system—tabu search approach for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and multiple products. *Journal of Heuristics* **19**(2) (Apr 2013) 233–252
14. Adiba, E., Messaoud, E., Ahemd, E.: A hybrid ant colony system for green capacitated vehicle routing problem in sustainable transport. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* **54** (08 2013) 198–208
15. Solomon, M.M.: Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Oper. Res.* **35**(2) (April 1987) 254–265
16. Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P.: The vehicle routing problems. In Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., Sandi, C., eds.: *Combinatorial Optimizations*. John Wiley & Sons, Nova Iorque (1979)
17. Darquennes, D.: Implementation and applications of ant colony algorithms. Master’s thesis, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur – Institut d’Informatique (2005)
18. Hartung, G.E.: Distâncias entre dois pontos – uca http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?pagina=espaco%2Fvisualizar_aula&aula=30254&secao=request_locale=es>, Acessado em 12/08/2015.
19. INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: Programa brasileiro de etiquetagem – PBE http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2016.pdf, Acessado em 20/06/2016.
20. ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível): Sistema de levantamento de preços http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Municipio_Index.asp, Acessado em 25/05/2017.
21. DATAGEO: Infraestrutura de dados espaciais ambientais do Estado de São Paulo <http://datageo.ambiente.sp.gov.br>, Acessado em 05/07/2017.