



GERENCIAMENTO DA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTRUTURAÇÃO E APLICAÇÃO DE MODELO NÃO-LINEAR DE PROGRAMAÇÃO POR METAS

Valeriana Cunha

Faculdade de Gestão e Negócios,
Universidade Federal de Uberlândia,
Av. Eng. Diniz, 1178, CEP 38401-136, Uberlândia, MG
e-mail: valeriana_cunha@uol.com.br

José Vicente Caixeta Filho

Departamento de Economia, Administração e Sociologia,
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz,
Universidade de São Paulo,
Av. Pádua Dias, 11/151, CEP 13418-900, Piracicaba, SP,
e-mail: jycaixet@esalq.usp.br

Resumo

Neste trabalho é desenvolvida e aplicada metodologia para auxiliar a tomada de decisões, nos níveis tático e operacional, do gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos. Tal metodologia, baseada em modelo matemático de otimização de programação não-linear por metas, foi aplicada à cidade de Piracicaba, SP. Pôde-se constatar alguns problemas, como falta de coleta convencional de todos os resíduos gerados em alguns setores, não otimização da frota de veículos existente, produtividades acima das estabelecidas como ótimas na maioria dos setores, densidades abaixo ou acima da média, entre outros. Além disso, verificou-se a necessidade de reestruturação dos setores de coleta para que o gerenciamento se torne mais eficaz. Com a aplicação do modelo, pôde-se concluir que tal ferramenta é útil na tomada de decisão nos níveis tático e operacional, podendo, inclusive, auxiliar na redefinição de estratégias a serem seguidas pelos tomadores de decisão.

Palavras-chave: logística, gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos, programação por metas.

1. Introdução

Procurando a palavra *lixo* no dicionário, encontram-se os seguintes significados: “1. Aquilo que se varre da casa, do jardim, da rua, e se joga fora; entulho. 2. Tudo o que não presta

e se joga fora. 3. Sujidade, sujeira, imundície. 4. Coisa ou coisas inúteis, velhas, sem valor. 5. Ralé” (Ferreira, 1986).

O próprio significado da palavra transmite a impressão de que lixo é algo sem valor, sem importância e que deve ser jogado fora. Ainda

hoje, muitas vezes, o lixo é tratado com a mesma indiferença da época das cavernas, quando o lixo não era verdadeiramente um problema, seja pela menor quantidade gerada, seja pela maior facilidade da natureza em reciclá-lo. Entretanto, em tempos mais recentes, a quantidade de lixo gerada no mundo tem sido grande e seu mau gerenciamento, além de provocar gastos financeiros significativos, pode provocar graves danos ao meio ambiente e comprometer a saúde e o bem-estar da população. É por isso que o interesse em estudar resíduos sólidos tem se mostrado crescente. O assunto tem se tornado tópico de debates em diversas áreas do conhecimento e sua importância crescente deve-se a três fatores principais:

- grande quantidade de lixo gerada – de acordo com dados de Brown (1993), a produção de lixo pode variar de aproximadamente 0,46 kg/hab/dia, em Kano (Nigéria), a 2,27 kg/hab/dia, em Chicago (Estados Unidos). Segundo Caixeta Filho (1999), o índice *per capita* brasileiro está em torno de 0,50 a 1,00 kg/hab/dia;
- gastos financeiros relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos – de

acordo com Brasil (2000), no Brasil, em média, os serviços de limpeza demandam de 7% a 15% do orçamento dos municípios;

- impactos ao meio ambiente e à saúde da população – a destinação final inadequada dos resíduos pode levar à contaminação do ar, da água, do solo e à proliferação de vetores nocivos à saúde humana.

2. Atividades gerenciais ligadas aos resíduos sólidos urbanos

Tchobanoglous (1977) afirma que as atividades gerenciais ligadas aos resíduos sólidos podem ser agrupadas em seis elementos funcionais, conforme ilustra a Figura 1.

2.1 Geração dos resíduos

A quantidade de resíduos produzida por uma população é bastante variável e depende de uma série de fatores, como renda, época do ano, modo de vida, movimento da população nos períodos de férias e fins de semana e novos métodos de acondicionamento de mercadorias, com a tendência mais recente de utilização de embalagens não retornáveis.

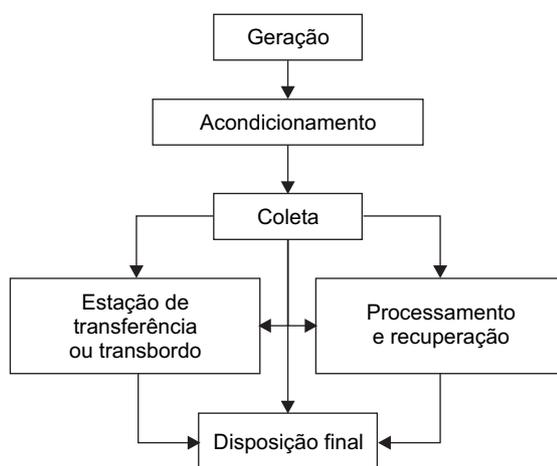


Figura 1 – O processo da coleta de resíduos sólidos e suas inter-relações.

Fonte: Tchobanoglous (1977).

A organização do gerenciamento do processo de coleta deve estar preocupada em coletar a maior quantidade gerada possível.

2.2 Acondicionamento

A primeira etapa do processo de remoção dos resíduos sólidos corresponde à atividade de acondicionamento do lixo. Podem ser utilizados diversos tipos de vasilhames, como: vasilhas domiciliares, tambores, sacos plásticos, sacos de papel, contêineres comuns, contêineres basculantes, entre outros. No Brasil, percebe-se grande utilização de sacos plásticos. O lixo mal-acondicionado significa poluição ambiental e risco à segurança da população, pois pode levar ao aparecimento de doenças. O lixo bem-acondicionado facilita o processo de coleta.

2.3 Coleta

A operação de coleta engloba desde a partida do veículo de sua garagem, compreendendo todo o percurso gasto na viagem para remoção dos resíduos dos locais onde foram acondicionados aos locais de descarga, até o retorno ao ponto de partida.

Segundo Jardim (2000), em 1997, a coleta de lixo no Brasil, considerando apenas os domicílios urbanos, era de aproximadamente 70%.

A coleta normalmente pode ser classificada em dois tipos de sistemas: sistema especial de coleta (resíduos contaminados) e sistema de coleta de resíduos não contaminados. Nesse último, a coleta pode ser realizada de maneira convencional (resíduos são encaminhados para o destino final) ou seletiva (resíduos recicláveis que são encaminhados para locais de tratamento e/ou recuperação).

Os tipos de veículos coletores são os mais diversos. Uma primeira grande classificação seria dividi-los em motorizados e não-motorizados (os que utilizam a tração animal como força motriz). Os motorizados podem ser divididos em compactadores, que, segundo Roth *et al.* (1999), podem reduzir a 1/3 o volume

inicial dos resíduos, e comuns (tratores, coletor de caçamba aberta e coletor com carrocerias tipo prefeitura ou baú). Há também os caminhões multicaçamba utilizados na coleta seletiva de recicláveis, em que os materiais coletados são alocados separadamente dentro da carroceria do caminhão.

No Brasil, a escolha do veículo coletor é, ainda, bastante empírica. Os resíduos coletados poderão ser transportados para estações de transferência ou transbordo, para locais de processamento e recuperação (incineração ou usinas de triagem e compostagem) ou para seu destino final (aterros e lixões).

2.4 Estação de transferência ou de transbordo

Segundo Mansur & Monteiro (2001), as estações de transferência ou transbordo são locais onde os caminhões coletores descarregam sua carga em veículos com carrocerias de maior capacidade para que, posteriormente, sejam enviadas até o destino final. O objetivo dessas estações é reduzir o tempo gasto no transporte e, conseqüentemente, os custos com o deslocamento do caminhão coletor desde o ponto final do roteiro até o local de disposição final do lixo.

2.5 Processamento e recuperação

Um dos métodos de processamento dos resíduos sólidos urbanos é a incineração. Roth *et al.* (1999) cita como vantagens do método a redução significativa do volume dos dejetos municipais, a diminuição do potencial tóxico dos dejetos e a possibilidade de utilização da energia liberada com a queima. Os mesmos autores destacam que os principais limitantes ou problemas derivados da incineração são os custos de instalação e operação do sistema (cerca de US\$ 20/t de lixo incinerado), a poluição atmosférica e a necessidade de mão-de-obra qualificada. Ainda segundo Roth *et al.* (1999), no Brasil, até 1999, menos de 30 municípios incineravam seus resíduos sólidos.

Como exemplo de método de recuperação dos resíduos, citam-se a reciclagem e a compostagem. A reciclagem é um processo pelo qual materiais que se tornariam lixo são desviados para ser utilizados como matéria-prima na manufatura de bens normalmente elaborados com matéria-prima virgem. Segundo Brasil (2000), dentre alguns benefícios da reciclagem pode-se citar a preservação dos recursos naturais, a redução da poluição do ar e das águas, a diminuição da quantidade de resíduos a ser aterrada e a geração de emprego com a criação de usinas de reciclagem. Por outro lado, a reciclagem de resíduos sólidos enfrenta obstáculos como diminuição da qualidade técnica do material, contaminação dos resíduos e custo comparativamente menor de utilizar matéria-prima virgem na fabricação de determinados produtos.

A compostagem, ou seja, a fabricação de compostos orgânicos a partir do lixo, é um método de decomposição do material orgânico putrescível (restos de alimentos, aparas e podas de jardins, folhas etc.) existente no lixo, sob condições adequadas, de forma a obter um composto orgânico (húmus) para uso na agricultura. Apesar de ser considerado um método de tratamento, a compostagem também pode ser entendida como um processo de reciclagem do material orgânico presente no lixo.

2.6 Disposição final

Em se tratando das alternativas de disposição final do lixo, Consoni *et al.* (2000) afirmam que o aterro sanitário é o que reúne as maiores vantagens, considerando a redução dos impactos ocasionados pelo descarte dos resíduos sólidos urbanos.

Outro método de disposição final dos resíduos é o aterro controlado. Segundo Roth *et al.* (1999), é menos prejudicial que os lixões pelo fato de os resíduos dispostos no solo serem posteriormente recobertos com terra, o que acaba por reduzir a poluição local. Porém, trata-se de solução com eficácia bem inferior à possibilitada pelos aterros sanitários, pois, ao

contrário destes, não ocorre inertização da massa de lixo em processo de decomposição.

De acordo com Consoni *et al.* (2000), os lixões constituem uma forma inadequada de descarte final dos resíduos sólidos urbanos. Problemas e inconvenientes, como depreciação da paisagem, presença de vetores de doenças, formação de gás metano e degradação social de pessoas, são fatores comuns a todos os lixões.

Segundo Prandini (1995), a maioria dos resíduos sólidos municipais coletados nas cidades brasileiras (aproximadamente 76% do total recolhido) não recebe destinação final adequada, sendo despejada em lixões, nos quais não há qualquer espécie de tratamento inibidor ou redutor dos efeitos poluidores. Ainda segundo o mesmo autor, apenas 10% do volume total coletado é depositado em aterros sanitários, 13% vai para aterros controlados, 0,9%, para usinas de triagem e compostagem e 0,1% é destinado à incineração.

3. Metodologia

O conceito de programação por metas é bastante semelhante ao conceito tradicional de programação matemática (por exemplo, linear ou não-linear). Entretanto, no conceito tradicional, os modelos são desenvolvidos considerando apenas um objetivo a ser minimizado ou maximizado. Para trabalhar com múltiplos objetivos, incomensuráveis ou não, o uso da técnica de programação por metas passa a ser uma alternativa interessante.

De acordo com Ravindran (1986), em programação por metas, para cada objetivo é determinado um nível que deverá ser atingido. A programação por metas trata esses objetivos como metas e não como restrições. É importante destacar a diferença entre a restrição real e a restrição relacionada à meta (ou simplesmente meta). Por exemplo, uma restrição real como a da equação (1) obriga que todos os valores possíveis para $x_1 + x_2$ sejam sempre iguais a 3.

$$x_1 + x_2 = 3 \quad (1)$$

Por outro lado, uma meta não requer obrigatoriamente que $x_1 + x_2$ seja igual a 3, e isso

implica que a solução pode conter valores maiores ou iguais a 3, bem como menores ou iguais a 3. Assim, nas metas são introduzidas variáveis que representam os desvios negativos e positivos do objetivo inicial a ser atingido, como mostra a equação (2).

$$x_1 + x_2 + d_1^- - d_1^+ = 3 \quad (2)$$

com

$$d_1^+, d_1^- \geq 0 \quad (3)$$

Perceba que se $d_1^- > 0$ e $d_1^+ = 0$, então $x_1 + x_2 < 3$; e se $d_1^+ > 0$ e $d_1^- = 0$, então $x_1 + x_2 > 3$.

Pode-se atribuir pesos a cada um dos desvios a serem minimizados. Sendo assim, a função objetivo seria descrita como na equação (4):

$$\min Z = \sum_k P_k \sum_i (w_{ik}^+ d_i^+ + w_{ik}^- d_i^-) \quad (4)$$

em que P_k representa a prioridade k , sendo que P_k é maior que P_{k+1} e w_{ik}^+ e w_{ik}^- são os pesos atribuídos à variável relacionada ao i -ésimo desvio na prioridade k . Dessa maneira, níveis de prioridade mais baixos só serão considerados após os níveis de prioridade mais altos terem sido atingidos. Isso significa que, mesmo quando uma meta de menor prioridade tiver peso maior que uma meta de prioridade superior, a de maior prioridade sempre será considerada em primeiro lugar.

3.1 O modelo proposto

É proposta uma abordagem que engloba múltiplos objetivos, contemplando metas para as variáveis consideradas importantes no sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos.

A primeira meta será minimizar a quantidade não coletada mensalmente na cidade. Para isso, a cidade é dividida em n setores i , sendo que cada setor tem sua respectiva taxa de geração de lixo mensal, que será definida como meta a ser coletada, representada por $M1_i$. A restrição relacionada a essa meta é representada na equação (5).

$$X_i + dc_i^- - dc_i^+ = M1_i \quad \text{para todo } i \quad (5)$$

em que:

X_i é a quantidade transportada de cada setor (i) até o aterro sanitário;

dc_i^- e dc_i^+ são os desvios negativo e positivo, por setor, da quantidade coletada em relação à quantidade gerada;

$M1_i$ é a primeira meta do modelo que representa a quantidade estimada de geração de resíduos em cada setor (i).

A parcela da função objetivo associada a essa meta é representada pela equação (6).

$$\min Z = P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- \quad (6)$$

em que:

Z é a variável que representa a soma dos desvios a serem minimizados e P_1 é a prioridade associada a essa meta.

Nessa meta, apenas o desvio negativo relacionado à coleta convencional (dc_i^-) deverá ser minimizado, pois ele representa a quantidade não coletada nos setores. O desvio positivo (dc_i^+) deverá ser igual a zero, pois a quantidade coletada (X_i) não poderá ser maior que a quantidade gerada ($M1_i$).

A segunda meta do modelo diz respeito ao percurso mensal, por setor, realizado pelos caminhões coletores. A restrição relacionada a essa meta é expressa na equação (7).

$$2 \times e_i \times v_i \times dias_i + dg \times 2 \times dias_i + \frac{X_i}{dens_i} + dp_i^- - dp_i^+ = M2_i \quad \text{para todo } i \quad (7)$$

em que:

e_i é a distância média de cada setor (i) ao aterro;
 v_i é o número de viagens diárias realizadas de cada setor (i) ao aterro;

dg é a distância do aterro à garagem;

$dias_i$ é o número de dias em um mês de coleta em cada um dos setores;

$dens_i$ é a densidade (kg/km) de coleta de cada setor (i);

dc_i^- e dc_i^+ são os desvios negativo e positivo, por setor, relacionados ao alcance da meta $M2_i$;

$M2_i$ é a segunda meta do modelo que corresponde à quilometragem a ser alcançada mensalmente em cada setor (i).

O primeiro termo da equação (7) – $2 \times e_i \times v_i \times dias_i$ – corresponde à distância percorrida do aterro sanitário a cada um dos setores durante um mês de coleta. Multiplica-se esse termo por 2, porque a cada viagem realizada, do aterro ao setor, os caminhões deverão retornar ao aterro para descarregar o lixo coletado. O segundo termo da equação (7) – $dg \times 2 \times dias_i$ – representa a distância mensal percorrida da garagem ao aterro sanitário. A multiplicação por 2 nesse termo é realizada, sobretudo, porque, geralmente, o aterro sanitário situa-se entre a garagem e os setores de coleta. Dessa maneira, o caminhão sairia no início do dia para começar a coleta, passaria pelo local do aterro sanitário e se dirigiria para os setores de coleta. No final do serviço, o lixo coletado na última viagem seria depositado no aterro, de onde o veículo coletor seguiria para a garagem.

O terceiro termo da equação (7) – $\frac{X_i}{dens_i}$ –

indica a quilometragem percorrida em um mês de coleta dentro de cada setor.

É importante destacar que esse terceiro termo da equação (7) – $\frac{X_i}{dens_i}$ –, que expressa a relação entre duas variáveis endógenas, dentro de uma equação matemática composta por outras variáveis endógenas, caracteriza a não-linearidade do modelo.

A função objetivo passaria então a ser representada por:

$$\min Z = P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ \quad (8)$$

em que P_2 é a prioridade associada à meta de minimização de distância percorrida.

Pretende-se coletar a maior quantidade de lixo possível, percorrendo-se a menor distância possível. Sendo assim, o desvio a ser minimizado deverá ser o positivo (dp_i^+), que representa a quilometragem percorrida acima da estabelecida como meta. Na equação (8) o

desvio negativo relacionado ao percurso (dp_i^-) não deverá ser minimizado, pois quanto maior for seu valor, menor será a quilometragem percorrida.

Ainda em relação à coleta, pretende-se minimizar a sub ou superutilização dos veículos coletores. A restrição relacionada a essa meta é descrita na equação (9).

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{\sum_{i=1}^n v_i \times dias_i \times cap} + dv^- - dv^+ = M3 \quad (9)$$

em que:

cap é a capacidade dos caminhões;

dv^- e dv^+ são os desvios negativo e positivo relacionados à sub e à superutilização da frota;

$M3$ é a terceira meta do modelo, relacionada ao número de veículos a serem utilizados no mês.

Deve-se minimizar, na função objetivo, os dois desvios da meta da frota total a ser utilizada, pois nesse caso interessa minimizar a sub (dv^-) e a superutilização (dv^+) de veículos. A nova função objetivo passa a ser representada pela equação (10):

$$\min Z = P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ + P_3 wv_3 dv^- + P_3 wv'_3 dv^+ \quad (10)$$

em que wv_3 e wv'_3 são os pesos atribuídos aos desvios negativo e positivo, respectivamente, e P_3 é a prioridade associada à meta do número de veículos a ser utilizado no mês.

Vale ressaltar que wv'_3 deverá ser maior que wv_3 , visto que a superutilização da frota seria mais prejudicial que a subutilização.

Os aterros sanitários podem ser considerados a melhor alternativa de disposição final dos resíduos. Entretanto, quanto menos lixo chegar aos aterros, maior será sua vida útil e menos problemas a cidade enfrentará na procura de novos locais para disposição final dos resíduos. Dessa maneira, deve-se tentar utilizar ao máximo a capacidade de usinas de triagem e

reciclagem dos municípios para que a menor quantidade possível de resíduos coletados seja levada até o aterro. Sendo assim, a quarta meta diz respeito à minimização da quantidade de resíduos sólidos que é transportada diretamente das zonas (i) para o aterro sanitário, representada pela equação (11) ou (12). A utilização de uma ou outra equação dependerá do tipo de resíduos a serem transportados ao local de processamento. Se na cidade de aplicação do modelo houver coleta seletiva de lixo, deve-se utilizar a equação (11), pois o termo Y_{it} representa a quantidade coletada seletivamente, de cada material t em cada setor i , a ser enviada à usina de triagem/reciclagem. Caso haja apenas coleta convencional, deve-se utilizar a equação (12), em que o termo Y_{it} é substituído por B_i , que representa a quantidade de resíduos coletados convencionalmente, por setor, a ser enviada à usina.

A meta relacionada a esse objetivo corresponde à capacidade máxima de recepção das usinas de triagem e reciclagem de resíduos sólidos urbanos.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{it} + da^- - da^+ = M4 \quad (11)$$

ou

$$\sum_{i=1}^n B_i + da^- - da^+ = M4 \quad (12)$$

em que:

Y_{it} é a quantidade coletada, seletivamente, do material reciclável t ($t = 1, \dots, T$) por setor i ;

B_i é a quantidade de resíduos coletada convencionalmente, por setor, a ser enviada à usina de triagem/compostagem;

da^- e da^+ são os desvios negativo e positivo relacionados à qualidade ambiental;

$M4$ é a quarta meta do modelo, está relacionada à qualidade ambiental e corresponde à capacidade máxima de recepção das usinas de triagem e reciclagem.

Dessa maneira, é necessário minimizar na função objetivo, o desvio ambiental negativo (da^-), pois este contribui para a não utilização da capacidade máxima de recepção das usinas de

triagem e reciclagem, conforme descrito na equação (13).

$$\begin{aligned} \min Z = & P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ + P_3 wv_3 dv^- + \\ & + P_3 wv'_3 dv^+ + P_4 da^- \end{aligned} \quad (13)$$

em que P_4 é a prioridade associada à meta de qualidade ambiental.

A quinta meta diz respeito à minimização das despesas com coleta, transferência, tratamento e disposição final do lixo coletado de maneira convencional. A equação (14) representa a restrição relacionada a essa meta.

$$c_i + do_i^- - do_i^+ = M5_i \quad \text{para todo } i \quad (14)$$

em que:

c_i é o custo total em reais (R\$) de se coletar e transferir o lixo dos setores i para o aterro, incluindo o custo de disposição no aterro. O custo de coleta é composto por uma parte fixa (depreciação, peças, salários dos motoristas e coletores) e por uma parte variável (gastos com combustível). O custo de disposição no aterro é composto pelos salários dos motoristas, pedreiros e ajudantes; gasto médio com combustível; gastos com equipamentos (máquina de esteira, pá carregadeira, caminhões e retroescavadeiras);

do_i^- e do_i^+ são os desvios negativo e positivo, por setor, relacionados à meta orçamentária.

$M5_i$ é a meta orçamentária operacional para coleta convencional em cada setor (i). Essa meta representa o valor provisionado em orçamento para despesas com coleta de lixo, em determinado município.

O desvio relacionado ao orçamento da coleta convencional que deverá ser minimizado é o positivo (do_i^+), pois ele contribui para um acréscimo nos valores de custos estabelecidos como metas. Quando o desvio negativo relacionado a essa meta (do_i^-) for maior que zero, os gastos serão menores que os estabelecidos como metas. Sendo assim, esse desvio não deverá ser minimizado, pois quanto maior for o desvio negativo, maiores serão as economias nos gastos com a coleta de lixo.

Entretanto, desvios negativos muitos elevados podem sinalizar uma superestimativa da meta de orçamento.

A função objetivo ficaria, então, descrita conforme ilustra a equação (15):

$$\begin{aligned} \min Z = & P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ + P_3 wv_3 dv^- + \\ & + P_3 wv'_3 dv^+ + P_4 da^- + P_5 \sum_{i=1}^n do_i^+ \end{aligned} \quad (15)$$

em que P_5 é a prioridade associada à meta orçamentária.

A sexta meta associada ao modelo é relacionada ao orçamento destinado à coleta seletiva dos resíduos urbanos, conforme mostra a expressão (16):

$$m_i + dos_i^- - dos_i^+ = M6_i \quad \text{para todo } i \quad (16)$$

em que:

m_i é o custo de processar o lixo reciclável dos setores i ;

dos_i^- e dos_i^+ são os desvios negativo e positivo, por setor, relacionados à meta orçamentária;

$M6_i$ é a meta orçamentária operacional da coleta seletiva dos resíduos urbanos em cada setor (i).

Como acontece com a coleta convencional, o desvio positivo relacionado à meta de custos com a coleta seletiva (dos_i^+) deverá ser minimizado, conforme ilustra a função objetivo na equação (17). Analogamente ao orçamento da coleta convencional, o desvio negativo relacionado à meta de orçamento da coleta seletiva (dos_i^-) não deve ser minimizado, pois isso poderia impedir uma possível economia dos gastos.

$$\begin{aligned} \min Z = & P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ + \\ & + P_3 wv_3 dv^- + P_3 wv'_3 dv^+ + P_4 da^- + \\ & + P_5 \sum_{i=1}^n do_i^+ + P_6 \sum_{i=1}^n dos_i^+ \end{aligned} \quad (17)$$

A sétima meta do modelo diz respeito ao alcance de um percentual mínimo de material coletado seletivamente por setor. São poucos os municípios brasileiros que realizam esse tipo de coleta e, mesmo naqueles que a realizam, o montante de lixo coletado seletivamente ainda é baixo. De qualquer forma, tal meta é representada pela equação (18).

$$\sum_{i=1}^T Y_{ii} + ds_i^- - ds_i^+ = M7_i \quad \text{para todo } t \quad (18)$$

em que:

$M7_i$ é a meta de quantidade ótima a ser coletada seletivamente em cada setor i .

Para essa meta, assim como para a meta relacionada à quantidade a ser coletada convencionalmente, o desvio negativo de coleta é o desvio a ser minimizado, pois a ele corresponde a quantidade não coletada seletivamente. Ao incluir essa meta, a função objetivo passa a ser descrita pela equação (19):

$$\begin{aligned} \min Z = & P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ + \\ & + P_3 wv_3 dv^- + P_3 wv'_3 dv^+ + \\ & + P_4 da^- + P_5 \sum_{i=1}^n do_i^+ + P_6 \sum_{i=1}^n dos_i^+ + \\ & + P_7 \sum_{i=1}^n ds_i^- \end{aligned} \quad (19)$$

A oitava meta do modelo, representada pela equação (20), diz respeito ao alcance de uma densidade média a ser obtida por setor.

A densidade representa a quantidade de lixo a ser coletada por quilômetro percorrido.

$$dens_i + dd_i^- - dd_i^+ = M8 \quad \text{para todo } i \quad (20)$$

em que: dd_i^- e dd_i^+ são os desvios negativo e positivo, por setor, relacionados à meta de densidade $M8$.

Quanto mais constante for essa densidade em cada um dos setores, melhor distribuídos serão os setores e, conseqüentemente, as equipes de trabalho, já que cada uma é responsável por, ao menos, um setor. Sendo assim, pretende-se

minimizar os dois desvios (dd_i^- e dd_i^+). Entretanto, a minimização de dd_i^- é mais importante do que a de dd_i^+ , visto que o primeiro contribui para diminuição da densidade média a ser atingida, portanto, wd_8 deverá ser maior que wd_8' .

A função objetivo ficaria, então, descrita como mostra a equação (21):

$$\begin{aligned} \min Z = & P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ + \\ & + P_3 wv_3 dv^- + P_3 wv'_3 dv^+ + P_4 da^- + \\ & + P_5 \sum_{i=1}^n do_i^+ + P_6 \sum_{i=1}^n dos_i^+ + P_7 \sum_{i=1}^n ds_i^- + \\ & + P_8 wd_8 \sum_{i=1}^n dd_i^- + P_8 wd'_8 \sum_{i=1}^n dd_i^+ \end{aligned} \quad (21)$$

A nona meta está relacionada à produtividade dos coletores em cada setor. Quanto mais uniforme for a produtividade, mais bem distribuídas serão as equipes de trabalho. Além disso, produtividades abaixo ou acima do padrão estabelecido estarão demonstrando sub ou superutilização da mão-de-obra dos coletores.

A meta de produtividade, ilustrada na equação (22), será medida em termos de quilogramas coletados a mais ou a menos que os quilogramas estabelecidos como meta por coletor diariamente.

$$X_i + dpr_i^- - dpr_i^+ = M9_i \quad \text{para todo } i \quad (22)$$

em que dpr_i^- e dpr_i^+ são os desvios negativo e positivo, por setor, relacionados à meta de produtividade dos coletores $M9_i$.

Como na meta anterior, pretende-se minimizar os dois desvios. A minimização de dpr_i^- deverá ter preferência em relação à minimização de dpr_i^+ , pois o primeiro desvio contribui para uma diminuição da produtividade dos coletores. Sendo assim, wpr'_9 deverá ser maior que wpr_9 .

A função objetivo completa para o modelo em questão é representada pela equação (23):

$$\min Z = P_1 \sum_{i=1}^n dc_i^- + P_2 \sum_{i=1}^n dp_i^+ + P_3 wv_3 dv^- +$$

$$\begin{aligned} & + P_3 wv'_3 dv^+ + P_4 da^- + P_5 \sum_{i=1}^n do_i^+ + \\ & + P_6 \sum_{i=1}^n dos_i^+ + P_7 \sum_{i=1}^n ds_i^- + P_8 wd_8 \sum_{i=1}^n dd_i^- + \\ & + P_8 wd'_8 \sum_{i=1}^n dd_i^+ + P_9 wpr_9 \sum_{i=1}^n dpr_i^+ + \\ & + P_9 wpr'_9 \sum_{i=1}^n dpr_i^- \end{aligned} \quad (23)$$

As restrições reais que compõem o modelo são:

Restrição de quantidade coletada

Esta restrição impõe que a quantidade de lixo transferida dos setores para o local de processamento, acrescida da quantidade de lixo transferida dos setores para os aterros, não totalize valor maior que a quantidade gerada em cada zona.

$$X_i + \sum_{t=1}^T Y_{it} + B_i \leq g_i \quad \text{para todo } i \quad (24)$$

em que g_i é a quantidade de resíduos gerados em cada setor.

Restrição de capacidade da usina de triagem e compostagem

Esta restrição indica que a capacidade máxima de recepção no local de processamento deve ser respeitada. A equação (25) deverá ser utilizada caso haja sistema de coleta seletiva na cidade em questão. Já a equação (26) deverá ser utilizada caso haja apenas coleta convencional.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{ti} \leq CAPAC \quad (25)$$

ou

$$\sum_{i=1}^n B_i \leq CAPAC \quad (26)$$

em que $CAPAC$ é a capacidade máxima de recepção da usina de triagem e compostagem.

Quando houver processamento de resíduos na cidade de aplicação do modelo, as seguintes equações contábeis devem ser incorporadas ao modelo:

Cálculo do nível de processamento 1

Esta equação indica a quantidade a que devem ser reduzidos, pelo processo de triagem/reciclagem ($índice_{1t}$), os resíduos coletados convencionalmente e transportados dos setores para o local de processamento. O $índice_{1t}$ representa a que porcentual os resíduos coletados convencionalmente podem ser reaproveitados, originando materiais recicláveis. Por exemplo, se para $t =$ vidro o índice for igual a 0,05, tem-se que 5% do total de lixo coletado convencionalmente (B_i) é composto por vidro, que poderá ser reaproveitado após passar pelo processo de triagem/reciclagem. O valor encontrado (A_t) é igual à quantidade, em toneladas, de cada material reciclável t proveniente do processo de triagem/reciclagem.

$$\sum_{i=1}^n B_i - \sum_{t=1}^T A_t \text{ deve ser igual à quantidade}$$

que será transferida da usina para os aterros, ou seja, é a parte do lixo que não foi aproveitada no processamento.

$$\sum_{i=1}^n B_i \times índice_{1t} = A_t \quad \text{para todo } t \quad (27)$$

Cálculo do nível de processamento 2

Esta equação indica a quantidade a que devem ser reduzidos, pelo processo de triagem/reciclagem ($índice_{2t}$), os resíduos coletados seletivamente e transportados dos setores para o local de processamento. O $índice_{2t}$ representa a que porcentual os resíduos coletados seletivamente podem ser reaproveitados, originando materiais recicláveis. Por exemplo, se para $t =$ papel o índice for igual a 0,4, tem-se que 40% do total de lixo coletado seletivamente (Y_{it}) é composto por papel que poderá ser reaproveitado após passar pelo processo de triagem/reciclagem. O valor encontrado (R_t) é igual à quantidade, em toneladas, de cada material reciclável t proveniente desse processo.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{it} - \sum_{t=1}^T R_t \text{ deve ser igual à quantidade}$$

que será transferida do local de processamento para os aterros.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{it} \times índice_{2t} = R_t \quad \text{para todo } t \quad (28)$$

Pode-se observar que o total de cada material reciclável t será igual a $A_t + R_t$.

Cálculo do nível de compostagem 1

Esta equação indica a quantidade a que devem ser reduzidos, pelo processo de triagem/compostagem ($índice_3$), os resíduos coletados convencionalmente e transportados dos setores para o local de processamento. O $índice_3$ representa a que porcentual os resíduos coletados convencionalmente podem ser reaproveitados, gerando material compostado. Por exemplo, se o índice for igual a 0,5, tem-se que 50% do total de lixo coletado convencionalmente (B_i) poderá ser reaproveitado após passar pelo processo de triagem/reciclagem. O valor encontrado (W) é igual à quantidade, em toneladas, de material resultante da compostagem por meio desse processo.

$$\sum_{i=1}^n B_i - W \text{ deve ser igual à quantidade que}$$

será transferida do local de processamento para os aterros.

$$\sum_{i=1}^n B_i \times índice_3 = W \quad (29)$$

Cálculo do nível de compostagem 2

Esta equação indica a quantidade a que devem ser reduzidos, pelo processo de triagem/compostagem ($índice_4$), os resíduos coletados seletivamente e transportados dos setores para o local de processamento. O $índice_4$ representa a que porcentual os resíduos coletados seletivamente podem ser reaproveitados, gerando material compostado. Por exemplo, se o índice for igual a 0,6, tem-se que 60% do total de lixo coletado seletivamente (Y_{it}) poderá ser reaproveitado após passar pelo processo de triagem/reciclagem. O valor encontrado (WW) é igual à quantidade, em toneladas, de material resultante da compostagem por meio desse processo.

$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{ti} - WW$ deve ser igual à quantidade

que será transferida do local de processamento para os aterros.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{ti} \times \text{índice}_4 = WW \quad (30)$$

Verifica-se que o total de material proveniente da compostagem será igual a $W + WW$.

Cálculo da quantidade de resíduos enviada ao aterro sanitário

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n X_i + \left[\sum_{i=1}^n B_i - \sum_{t=1}^T A_t \right] + \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{ti} - \right. \\ & \left. - \sum_{t=1}^T R_t \right] + \left[\sum_{i=1}^n B_i - W \right] + \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n Y_{ti} - \right. \\ & \left. - WW \right] = QAT \quad (31) \end{aligned}$$

em que QAT é a quantidade de resíduos encaminhada ao aterro sanitário.

3.2 Aplicação do modelo

O modelo desenvolvido foi aplicado à cidade de Piracicaba, SP. Os dados utilizados correspondem a situações reais ocorridas no período de janeiro de 1999 a outubro de 2000. Convém ressaltar que, para alguns dados, como, por exemplo, quantidade de recicláveis coletada na cidade, não há informações para todo o período. Todos os valores utilizados são valores médios, não representando nenhum mês específico. O modelo é genérico e não foi aplicado para um mês específico.

No período analisado, a coleta de resíduos sólidos urbanos em Piracicaba era feita por 10 veículos coletores com capacidade média de 8,5 toneladas cada um. Além desses 10 veículos, havia mais 2 que faziam parte da frota denominada “reserva técnica”. Havia 16 equipes que trabalhavam na coleta e cada uma era composta por 1 motorista e 3 ou 4 coletores.

Para fins de coleta de lixo, a cidade é dividida em 28 setores, numerados de 1 a 27, e, em razão

do grande crescimento dos setores 16 e 17, criou-se um setor intermediário denominado setor 16/17, englobando partes de cada um deles. Cada um desses 28 setores (1 a 27 e 16/17) tem uma geração mensal de lixo g_i . Em agosto e setembro de 2000 foram coletados 6.608.276,63 kg e 6.550.849,57 kg, respectivamente. Para realizar a coleta convencional são utilizados diferentes percursos em cada um desses setores.

Além da coleta convencional, em Piracicaba há coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos, encaminhados para o Centro de Reabilitação de Piracicaba. A coleta seletiva é do tipo “entrega voluntária” e, no período da pesquisa, a cidade contava com 130 pontos de coleta (41 condomínios, 7 empresas, 45 residências, 3 órgãos públicos, 6 contêineres, 18 estabelecimentos comerciais e 10 escolas). Dois caminhões cedidos pela Secretaria de Defesa do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Piracicaba realizam a coleta nesses 130 pontos da cidade.

3.2.1 Especificação dos dados que compõem o modelo

3.2.1.1 Primeira meta

Os dados disponíveis para determinação da primeira meta (Tabela 1) do modelo (quantidade a ser coletada por setor) são: quantidades coletadas de lixo em Piracicaba, por setor, nos meses de agosto e setembro de 2000 e quantidades agregadas mensais de coleta de resíduos sólidos urbanos em Piracicaba, de janeiro de 1989 a dezembro de 1999. Utilizando esses dados conjuntamente, a sazonalidade da geração de resíduos durante todo o ano estará sendo incluída. O cálculo será realizado de acordo com os seguintes passos:

1. Utilizando os dados agregados mensais de 1989 a 1999, calcula-se o valor médio coletado em cada ano. Os valores mensais observados de janeiro a dezembro de cada ano são, então, comparados ao valor médio do ano correspondente. Dessa maneira, são obtidas as variações em relação à média de cada mês, de cada ano. Por exemplo, em 1989, a média coletada

foi de 4.196,06 toneladas. Em janeiro desse mesmo ano, o total coletado foi de 4.423,98 toneladas. Com esses dados, percebe-se que em janeiro de 1989 foi coletado aproximadamente 5,43% a mais que a média desse ano. Esse cálculo foi realizado para todos os meses de todos os anos. Posteriormente, foi calculada uma média geral de variação para cada mês, ou seja, tomaram-se as variações de janeiro a dezembro de 1989 a 1999 em relação à média e calculou-se a média global

($\sum_{i=1}^{11}$ variação porcentual em relação à média de cada mês/11) para obter a variação média de cada mês.

- Utilizando os valores das variações calculados no passo 1, tomam-se os dados referentes a agosto ou setembro de 2000. Supondo que o mês de setembro foi o escolhido, pelos cálculos realizados no passo 1, sabe-se que nesse mês coleta-se aproximadamente 0,43% menos lixo que a

média. Assim, pode-se calcular o valor médio, que será utilizado como referência para a primeira meta do modelo.

Os valores estabelecidos, por setor, para a primeira meta são descritos na Tabela 1. O total de resíduos sólidos a ser coletado é de 5.579.032,80 kg.

A metodologia para calcular o valor da primeira meta pode ser definida de acordo com a estratégia adotada. Há formas alternativas para calcular essa meta. Ela pode ser determinada, por exemplo, pela estimativa de geração de resíduos *per capita* em cada cidade, multiplicada pelo valor da população.

Pode-se aprimorar essa meta considerando-se diferentes taxas de geração *per capita* de resíduos, dependendo do nível de renda ou modo de vida da população de cada setor. Além disso, há outros fatores, como época do ano, fins de semana, dias festivos, movimento da população durante os períodos de férias e novos métodos de acondicionamento de mercadorias que devem ser considerados.

Tabela 1 – Valores numéricos da primeira meta do modelo – quantidades mensais a serem coletadas convencionalmente, por setor, em Piracicaba, SP.

Setores	1ª meta						
01	242.687,93	02	299.594,06	03	288.993,90	04	225.392,92
05	201.403,08	06	185.223,89	07	211.445,34	08	144.496,95
09	174.623,73	10	287.320,19	11	215.350,66	12	189.687,12
13	239.898,41	14	201.960,99	15	151.749,69	16	140.033,72
16/17	135.570,50	17	174.623,73	18	233.203,57	19	209.213,73
20	181.318,57	21	153.423,40	22	217.582,28	23	154.539,21
24	181.876,47	25	196.939,86	26	143.939,05	27	196.939,86

Fonte: Dados da pesquisa.

3.2.1.2 Segunda meta

Os valores numéricos para a segunda meta são descritos na Tabela 2 e foram encontrados com base na equação (32):

$$[(v_i \times 2 \times e_i \times dias_i) + (2 \times dias_i \times dg) + (km_i \times dias_i)] \times 1,40 \quad \text{para todo } i \quad (32)$$

em que:

v_i é a frequência diária de viagens realizadas de cada setor (i) ao aterro sanitário (2,15 viagens para os setores de coleta diária e 2,6 viagens para os setores de coleta em dias alternados);

e_i é a distância de cada setor i ao aterro sanitário;

dg é a distância do aterro sanitário à garagem (6 km);

km_i é o comprimento total das vias de cada setor i . Com a ferramenta computacional AutoCad mediu-se o comprimento total do conjunto de vias pertencentes a cada setor.

O primeiro termo da equação (32) – $v_i \times 2 \times e_i \times dias_i$ – corresponde à distância percorrida do aterro sanitário a cada um dos setores durante um mês de coleta. O segundo

termo da equação – $2 \times dias_i \times dg$ – representa a distância mensal percorrida da garagem ao aterro sanitário. A multiplicação por 2 é realizada nesse termo, pois, geralmente, o aterro sanitário situa-se entre a garagem e os setores de coleta. O terceiro termo da equação (32) – $km_i \times dias_i$ – indica a quilometragem percorrida durante um mês de coleta dentro de cada setor.

Essa equação é multiplicada por 1,40, pois está sendo considerado fator de correção de 40% para a quilometragem a ser percorrida. O fator de correção se justifica, pois, normalmente, não se consegue percorrer apenas a distância correspondente ao perímetro, em razão das ruas sem saída ou das mãos de direção de algumas vias. De acordo com Aguiar (1993), nota-se que o uso de um programa de otimização de rotas apresenta uma repetição em torno de 40%.

Alternativamente, é possível determinar essa meta seguindo outros critérios, como, por exemplo, trabalhando com os valores fornecidos por algum software de roteirização em vez de utilizar o valor do comprimento total de todas as vias do setor acrescido do fator de correção.

Tabela 2 – Valores numéricos da segunda meta do modelo – quilometragem mensal a ser percorrida na coleta convencional, por setor, em Piracicaba, SP.

Setores	2ª meta						
01	3.290,56	02	2.485,76	03	2.803,53	04	1.347,71
05	2.172,90	06	2.198,56	07	2.198,56	08	2.117,57
09	1.680,04	10	1.955,59	11	2.623,71	12	2.346,89
13	2.384,75	14	2.076,07	15	1.978,52	16	1.696,24
16/17	1.674,58	17	2.373,64	18	1.214,49	19	2.233,87
20	2.484,48	21	3.066,15	22	1.768,13	23	1.557,56
24	2.088,63	25	1.581,03	26	2.071,52	27	2.547,82

Fonte: Dados da pesquisa.

3.2.1.3 Terceira meta

A meta de número de veículos a serem utilizados é determinada pelo tamanho da frota da empresa de limpeza urbana menos a reserva técnica (em Piracicaba, 10 veículos). Não deverá haver sub ou superutilização dos mesmos, sendo que a superutilização deverá ter peso maior que a subutilização, pois, caso a empresa responsável pela coleta necessite de mais veículos do que dispõe, ela deverá alugar ou até adquirir novos veículos para conseguir realizar a coleta de maneira apropriada.

Na aplicação do modelo não foram atribuídos pesos diferentes para a superutilização e a subutilização da frota, porém atribuíram-se prioridades diferentes a cada um desses itens.

A meta relacionada a veículos dependerá da estratégia relacionada à composição da frota. Pode-se determinar novos valores de meta de acordo com o tipo de veículo coletor utilizado e sua respectiva capacidade. Além disso, pode-se trabalhar com veículos de diferentes tipos ou capacidade nos diferentes setores.

3.2.1.4 Quarta meta

Na cidade não há usina de triagem e reciclagem, portanto, essa meta não será considerada.

3.2.1.5 Quinta e sexta metas

A quinta meta refere-se ao orçamento destinado à coleta convencional e a sexta, ao orçamento destinado à coleta seletiva. Sendo assim, admitindo-se que sejam coletados e aterrados 5.579.032,80 kg convencionalmente e que 1.000.015,31 kg sejam coletados seletivamente por mês na cidade, a meta orçamentária operacional total da empresa deverá ser de R\$ 174.344,78 para coleta convencional (incluindo aterro) e R\$ 41.000,63 para coleta seletiva. Os valores dessas metas para cada setor são mostrados nas Tabelas 3 e 4. O cálculo dessas metas dependerá dos custos envolvidos, que poderão ser modificados em função da estratégia que vier a ser adotada.

3.2.1.6 Sétima meta

A sétima meta se relaciona à quantidade mínima a ser coletada de cada produto reciclável e foi imposta pela prefeitura de Piracicaba em 2001.

Tabela 3 – Valores numéricos da quinta meta – orçamento mensal, por setor, para a coleta convencional em Piracicaba, SP, 2000.

Setores	5ª meta						
01	7.584,00	02	9.362,31	03	9.031,06	04	7.043,53
05	6.293,85	06	5.788,25	07	6.607,67	08	4.515,53
09	5.456,99	10	8.978,76	11	6.729,71	12	5.927,72
13	7.496,83	14	6.311,28	15	4.742,18	16	4.376,05
16/17	4.236,58	17	5.456,99	18	7.287,61	19	6.537,93
20	5.666,21	21	4.794,48	22	6.799,45	23	4.829,35
24	5.683,64	25	6.154,37	26	4.498,10	27	6.154,37

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 4 – Valores numéricos da sexta meta – orçamento mensal, por setor, para coleta seletiva em Piracicaba, SP, 2000.

Setores	6ª meta						
01	1.783,53	02	2.201,73	03	2.123,83	04	1.656,43
05	1.480,12	06	1.361,22	07	1.553,92	08	1.061,92
09	1.283,32	10	2.111,53	11	1.582,62	12	1.394,02
13	1.763,03	14	1.484,22	15	1.115,22	16	1.029,12
16/17	996,32	17	1.283,32	18	1.713,83	19	1.537,52
20	1.332,52	21	1.127,52	22	1.599,02	23	1.135,72
24	1.336,62	25	1.447,32	26	1.057,82	27	1.447,32

Fonte: Dados da pesquisa.

A meta da coleta seletiva deverá alcançar um nível de 15,2% do lixo total produzido, o que corresponde a 1.000.015,31 kg/mês. Os valores dessa meta, por setor, são descritos na Tabela 5.

Em Piracicaba, SP, os resíduos coletados seletivamente são encaminhados ao Centro de Reabilitação de Piracicaba, que emprega pessoas portadoras de deficiência física e mental para trabalharem no processo de triagem/segregação e processamento dos materiais coletados para reciclagem.

3.2.1.7 Oitava e nona metas

A oitava meta do modelo estabelece que cada equipe de trabalho deve, em média, coletar 195,15 kg/km. A manutenção desse valor médio indica que as equipes de trabalho têm, em média, produtividades semelhantes.

A meta relacionada à densidade dependerá da definição da primeira e da segunda metas, pois o valor da densidade é o resultado da razão entre a quantidade coletada e a quilometragem percorrida.

Tabela 5 – Quantidades a serem coletadas seletivamente, por setor, em Piracicaba, SP, 2000.

Setores	7ª meta						
01	43.500,67	02	53.700,82	03	51.800,79	04	40.400,62
05	36.100,55	06	33.200,51	07	37.900,58	08	25.900,40
09	31.300,48	10	51.500,79	11	38.600,59	12	34.000,52
13	43.000,66	14	36.200,56	15	27.200,42	16	25.100,38
16/17	24.300,37	17	31.300,48	18	41.800,64	19	37.500,57
20	32.500,50	21	27.500,42	22	39.000,60	23	27.700,42
24	32.600,50	25	35.300,54	26	25.800,40	27	35.300,54

Fonte: Dados da pesquisa.

A nona meta do modelo é relacionada à produtividade dos coletores. Será considerada como valor da produtividade diária de um gari a média desses dois estudos: 2.900 quilogramas de lixo por dia. A manutenção dos valores estipulados indicará que os setores estão bem distribuídos quanto à utilização de suas equipes de trabalho, não havendo, assim, sub ou superutilização de mão-de-obra.

Na aplicação do modelo não foram atribuídos pesos diferentes para densidades e produtividades acima e abaixo da média. Atribuíram-se prioridades diferentes a cada um desses itens.

Para aplicação do modelo, as equações (11), (12), (25), (26), (27), (29) e (30) não serão consideradas, pois representam situações não vigentes em Piracicaba, SP. Além disso, na equação (24) serão considerados apenas os dois primeiros termos do lado esquerdo da equação, pois não há coleta convencional de resíduos a serem encaminhados à usina de triagem/compostagem. Em relação à equação (28), para o caso específico de Piracicaba, SP, considerou-se que todo o material reciclável que chega ao local de processamento é reaproveitável, ou seja, o índice utilizado para dedução da quantidade aproveitável é igual a 1.

O modelo matemático formulado foi solucionado pela linguagem de otimização GAMS (Brooke *et al.*, 1998). As metas podem ser ordenadas de diferentes maneiras. Pode-se, em determinado momento, priorizar a meta orçamentária e, em outro momento, priorizar a quantidade a ser coletada.

3.3 Resultados obtidos

Serão apresentados os resultados para o modelo não-linear que considera a seguinte seqüência de metas: quantidades coletadas convencionalmente ($M1_i$), percurso realizado ($M2_i$), quantidades coletadas seletivamente ($M7_i$), veículos super e subutilizados ($M3$), orçamento da coleta convencional ($M5_i$), orçamento da coleta seletiva ($M6_i$), densidade abaixo e acima da estabelecida ($M8$) e produtividade inferior e

superior à estabelecida ($M9_i$). O valor do desvio total para essa ordenação, ponderado pelas prioridades, foi de R\$ 1.229.006,69.

Conseguiu-se coletar toda a quantidade estabelecida como meta para a coleta convencional (desvios nulos para $M1$).

Todos os setores conseguiram percorrer a quilometragem estabelecida como meta ($M2$), exceto o setor 11, que percorreu 70,01 km a menos que os 2.623,71 km estabelecidos, e o setor 20, que percorreu 68,67 km a menos que os 2.484,48 km estabelecidos. Entretanto, os valores de desvio negativo para a meta de quilometragem não são somados à função objetivo.

Houve superutilização de 1 veículo nas 2^{as}, 4^{as} e 6^{as}-feiras, pois foram utilizados 11 veículos (desvio positivo para $M3$ igual a 1). A taxa de aproveitamento dos veículos foi de 92,09%, já que o valor fornecido pelo modelo foi de 10,13 veículos. Nas 3^{as}, 5^{as} e sábados não houve sub ou superutilização de veículos (desvios para $M3$ iguais a zero). Foram utilizados os 10 veículos, com taxa de aproveitamento de 98,9% (o valor fornecido pelo modelo foi de 9,89).

O orçamento da coleta convencional foi ultrapassado nos setores 1, 3, 8, 15, 16, 16/17, 17, 20, 21, 23 e 26. O maior desvio positivo para $M5$ ocorreu no setor 1 (R\$ 1.622,67 acima dos R\$ 7.584,00 estabelecidos) e o menor, no setor 20 (R\$ 213,82 acima dos R\$ 5.666,21 estabelecidos).

Entretanto, houve sobras (desvios negativos para $M5$) nos setores 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 19, 22, 24, 25 e 27. A maior sobra ocorreu no setor 10 (R\$ 2.670,59 utilizados a menos que os R\$ 8.978,76 estabelecidos), enquanto a menor sobra ocorreu no setor 24 (R\$ 11,78 a menos que os R\$ 5.683,64 estipulados).

O orçamento da coleta seletiva ultrapassou o estabelecido em R\$ 3.598,69, não havendo sobras de orçamento em nenhum dos setores (desvios negativos para $M6$ iguais a zero). O setor que mais ultrapassou o valor estabelecido como meta foi o setor 2 (R\$ 193,25 dos R\$ 2.201,73 estabelecidos), enquanto o setor 16/17 foi o que menos ultrapassou o valor da meta (R\$ 87,44 dos R\$ 996,32 estabelecidos).

A quantidade coletada seletivamente foi alcançada em todos os setores (desvios para $M7$ iguais a zero). Nenhum setor alcançou a meta estabelecida de densidade de 195,15 kg/km. A somatória dos valores de densidade superiores à média estabelecida foi de 833,25. A somatória dos valores de densidade inferiores à média estabelecida também foi de 833,25. Os setores 2, 4, 7, 9, 10, 14, 18, 22 e 23 apresentaram valores de densidade acima da média estabelecida. O maior desvio positivo ocorreu no setor 18 (300,64) e o menor, no setor 14 (21,31). Todos os outros setores apresentaram desvios negativos para a meta de densidade. O maior desvio negativo ocorreu no setor 20 (82,19) e o menor, no setor 13 (5,07).

A meta de produtividade também não foi alcançada em nenhum setor. Esta ficou abaixo de 100% para os setores 8 (faltando 6.303,05 kg para serem coletados, a fim de que a produtividade atingisse 100%), 16 (faltando 10.766,28 kg para serem coletados a fim de que a produtividade atingisse 100%) e 26 (faltando 6.860,95 kg para serem coletados, a fim de que a produtividade atingisse 100%). A produtividade foi acima de 100% para todos os outros setores, sendo que 1.192.063,09 kg foram coletados graças a valores de produtividade maiores que os 100% estabelecidos.

4. Conclusões

O modelo é útil na tomada de decisão nos níveis tático e operacional, o que confirma a hipótese formulada no início da pesquisa. As características vigentes dos sistemas de gerenciamento da coleta, como, por exemplo, a divisão de setores existentes e os tipos de veículos utilizados, são consideradas dadas. Entretanto, apesar de considerar o sistema já estruturado e de tentar otimizar o gerenciamento em um sistema predeterminado, o modelo não é rígido. Sua flexibilidade está na determinação dos níveis das metas. Durante o desenvolvimento do trabalho, foram sugeridas maneiras distintas de calcular as metas, dependendo do

tipo de estratégia a ser adotada pelo tomador de decisão.

Além disso, ao utilizar o modelo, podem-se detectar necessidades de mudanças na estrutura do sistema, auxiliando na reestruturação da estratégia. A constatação da necessidade de redimensionamento dos setores de coleta e a necessidade de reconfiguração da frota utilizada, envolvendo veículos de capacidades diferentes para setores com características distintas, são alguns exemplos de como o modelo tático/operacional pode ser útil para detectar problemas na estratégia adotada.

Com a aplicação do modelo, percebe-se que os setores podem estar mal dimensionados. Seria então recomendável o redimensionamento daqueles que não tiveram toda a quantidade estabelecida coletada e que circundam setores que cumpriram essa meta. Tal medida diminuiria não só as defasagens de quantidades coletadas em alguns setores, como também as de produtividade, de densidades, de orçamento disponível para o setor, entre outras.

Acredita-se que a coleta seletiva apresenta um sério problema de produtividade. Por utilizar mão-de-obra de deficientes físicos/mentais, a produtividade máxima possível não é alcançada, o que leva a um aumento do custo operacional. Entretanto, ocupar os deficientes em um trabalho como este é algo louvável do ponto de vista social.

O modelo apresenta algumas limitações. Em relação à determinação dos valores ótimos para as metas, deve-se salientar que, na designação de valores para a meta relacionada ao tamanho do percurso a ser realizado pelos veículos coletores, apesar de não se considerarem exatamente as mãos de direção de cada uma das ruas ou avenidas, bem como a existência de ruas sem saída, atribuiu-se um fator de correção de 40% para minimizar as distorções que esses problemas podem causar.

Além disso, como ressaltado anteriormente, o modelo proposto é adequado para os níveis tático e operacional, não sendo, portanto, indicado para a determinação das melhores estratégias a serem adotadas.

Referências Bibliográficas

- AGUIAR, E. M. de. *Racionalização da operação de sistemas de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares para cidades de pequeno e médio porte*. 1993. 145 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BIGARELLI, W. O bom lixeiro. *Brasil Transportes*, v. 34, n. 358, p. 20-25, jun./jul. 1997.
- BRASIL Governo do Distrito Federal. Disponível em: <<http://www.gdf.gov.br>>. Acesso em 8 mai. 2000.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A.; RAMAN, R. *Gams: a user's guide*. Washington: Gams Development Corporation, 1998. 262 p.
- BROWN, D. T. *The legacy of the landfill: perspectives on the solid waste crisis*. St. Catharines: Brock University. Institute of Urban and Environmental Studies, 1993. Disponível em <<http://www.brocku.ca/epi/legacy.txt>>. Acesso em: 8 ago. 2000.
- CAIXETA FILHO, J. V. *Avaliação do potencial de utilização de tecnologias de roteirização por empresas de coleta de resíduos sólidos urbanos*. Piracicaba: USP, ESALQ, 1999. 39 p. (Relatório técnico de projeto de pesquisa apoiado pelo CNPq).
- CONSONI, A. J.; SILVA, I. C.; GIMENEZ FILHO, A. Disposição final do lixo. In: D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.). *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE, 2000. cap. 5, p. 251-291.
- FERREIRA, A. B. de H. *Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa*. 41. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.
- JARDIM, N. S.; WELLS, C.; CONSONI, A. J.; AZEVEDO, R. M. B. de. Gerenciamento integrado do lixo municipal. In: D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.). *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE, 2000. cap. 1, p. 3-25.
- MANSUR, G. L.; MONTEIRO, J. H. R. P. *O que é preciso saber sobre limpeza urbana*. Rio de Janeiro: Centro de Estudos e Pesquisas Urbanas do Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Disponível em: <http://www.resol.com.br> e <<http://www.resol.com.br/cartilha>>. Acesso em: 20 jul. 2001.
- PRANDINI, F. L.; D'ALMEIDA, M. L. O.; JARDIM, N. S.; MANO, V. G. T.; WELLS, C.; CASTRO, A. P. de; SCHNEIDER, D. M. O gerenciamento integrado do lixo municipal. In: D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.). *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE, 1995. cap. 1.
- RAVINDRAN, A.; PHILLIPS, D. T.; SOLBERG, J. J. *Operations research: principles and practice*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 637 p.
- ROTH, B. W.; ISAIA, E. M. B. I.; ISAIA, T. Destinação final dos resíduos sólidos urbanos. *Ciência e Ambiente*, n. 18, p. 25-40, jan./jun. 1999.
- TCHOBANOGLOUS, G. *Solid wastes: engineering principles and management*. Issues. Tokyo: McGraw-Hill, 1977.

MANAGEMENT OF SOLID URBAN WASTE COLLECTION: STRUCTURING AND APPLICATION OF A NON-LINEAR GOAL PROGRAMMING MODEL

Abstract

This work presents a methodology that has been developed and applied to help the decision-making process, at both tactical and operational levels, in solid urban waste management. This methodology, based on an optimization mathematical model of Non-Linear Goal Programming, has been applied to Piracicaba, a city in the State of São Paulo. Some problems in tactical and operational management of solid urban waste collection have been found there, such as lack of standard collection of all the waste generated in some areas, non-optimization of fleet of vehicles available, productivity above that established as optimal in most areas, densities below or above average, among others. Furthermore, the need of restructuring collection areas has been noticed so that management can be more effective. Upon applying the model, it was concluded that such tool is useful in tactical and operational decision-making, as well as in helping redefining strategies to be followed by decision-makers.

Key words: logistics, management of solid urban waste collection, goal programming.