

SELEÇÃO DE PONTOS DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CIDADE DE CARUARU

Armando Dias Duarte (UFPE)

armando01.dias@gmail.com

Tatiana Balbi Fraga (UFPE)

tatiana.balbi@ufpe.br

Gilson Lima da Silva (UFPE)

glimasilva21@yahoo.com.br

LUANA LAGEDO SANTOS (UFPE)

luanalsantos@hotmail.com.br



O crescente desenvolvimento das áreas urbanas com as consequentes intervenções antrópicas transformadoras de recursos naturais em produtos, para o atendimento das suas necessidades, tem gerado uma quantidade exponencial de resíduos sólidos, provocando por sua vez, impactos negativos significativos no meio ambiente.

Buscando contribuir para uma melhor gestão dos resíduos sólidos da cidade de Caruaru - PE, nesse trabalho foi realizado um diagnóstico sobre o lixo produzido no município e também apresentado um cálculo sobre a quantidade de PEVs necessária para atender a produção do lixo reciclável. Tendo em vista que a instalação de todos os PEVs necessários seria inviável economicamente para o poder público, foi proposto um modelo matemático para o problema de localização dos PEVs buscando-se maximizar, o lucro dos resíduos coletados, levando-se em conta o custo da rota de coleta assim como o limite de recursos disponível para instalação dos PEVs. O modelo apresentado poderá ser futuramente implantado em municípios com porte similares a Caruaru. Esse modelo permitirá uma melhor otimização na instalação dos PEVs, porém para que a ação seja eficaz e exitosa, são necessárias campanhas de educação ambiental visando à conscientização da população, bem como a distribuição de bonificações (incentivo fiscais ou premiações), como fatores de incentivo à adoção de práticas sustentáveis como a coleta seletiva e a reciclagem de resíduos.



Palavras-chave: Gestão Ambiental, Pontos de Entrega Voluntária, Modelagem Matemática

1. Introdução

Com o crescente desenvolvimento das áreas urbanas, a atividade praticada pelo homem, transformando os recursos naturais em produtos que atendam às suas necessidades, tem ocasionado, cada vez mais, impacto significativo no meio ambiente através da produção do lixo urbano. Segundo Tadeu *et al.* (2013) essa produção é de tal intensidade que atualmente não é possível conceber uma cidade sem considerar a geração dos Resíduos Sólidos (RS), desde a etapa da geração até a disposição final. Há uma dificuldade de solução da problemática, pois a maior parte das cidades brasileiras apresenta um serviço de coleta que não prevê a segregação dos resíduos na fonte.

Um dos primeiros passos para a resolução da problemática dos RS nas cidades brasileiras consiste em investir na conscientização da população para que programas de coleta seletiva sejam efetivamente implantados e que garantam sucesso entre a população e o poder público. Contudo também é preciso planejar e investir no processo de coleta e reciclagem do lixo urbano de forma que o esforço realizado pela população seja aceitável e não seja desperdiçado. A instalação de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) deve ser uma preocupação importante no planejamento da coleta seletiva, pois a localização dos PEVs deve atender da melhor forma possível a população, sem, no entanto, gerar um custo exorbitante para o poder público. O presente trabalho tem como objetivo propor um modelo matemático para o problema de localização dos PEVs buscando-se maximizar o lucro dos resíduos coletados, levando-se em conta o limite de recursos disponível para instalação desses equipamentos assim como o custo da rota de coleta.

Buscando avaliar a aplicação do modelo matemático e auxiliar na tomada de decisão pelo poder público municipal, foi determinado o número de PEVs necessários para atender os bairros da cidade de Caruaru, sem levar em conta o custo de instalação dos PEVs. Com foco nestes objetivos, foi levantado a atual situação da coleta seletiva de lixo no Brasil e sobre os diferentes tipos de reciclagem. Um diagnóstico sobre o lixo produzido na cidade de Caruaru foi realizado com intuito de subsidiar o cálculo da quantidade de PEVs necessária para atender a produção potencial de lixo reciclável e consequentemente auxiliar na instalação dos PEVs.

2. Coleta seletiva de lixo no Brasil e os tipos de reciclagem

Segundo Dias (2006), o primeiro projeto de coleta seletiva no Brasil ocorreu na cidade de São Paulo e a primeira organização de uma cooperativa de reciclagem, a Cooperativa dos Catadores de Papel, Aparas e Materiais Reaproveitáveis (Coopamare), foi fundada no ano de 1989. De acordo com dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, ABRELPE (2010), no Brasil 57,6% dos municípios indicaram que houve iniciativas de coleta seletiva. Porém, muitas dessas iniciativas se resumiram a formalizações simples de convênios com cooperativas de catadores para a execução de serviços. Conforme os dados do estudo realizado pelo Ciclossoft no ano de 2012, apenas 14% dos municípios brasileiros ofereceram serviços de coleta seletiva, deste total, 86% estão nas regiões Sul e Sudeste e apenas 12% da população brasileira são atendidas com a coleta seletiva (CEMPRE, 2013). De acordo com esse mesmo estudo a coleta seletiva é de suma importância como fonte de abastecimento do mercado de reciclagem. Dentre as formas de coleta seletiva podemos citar:

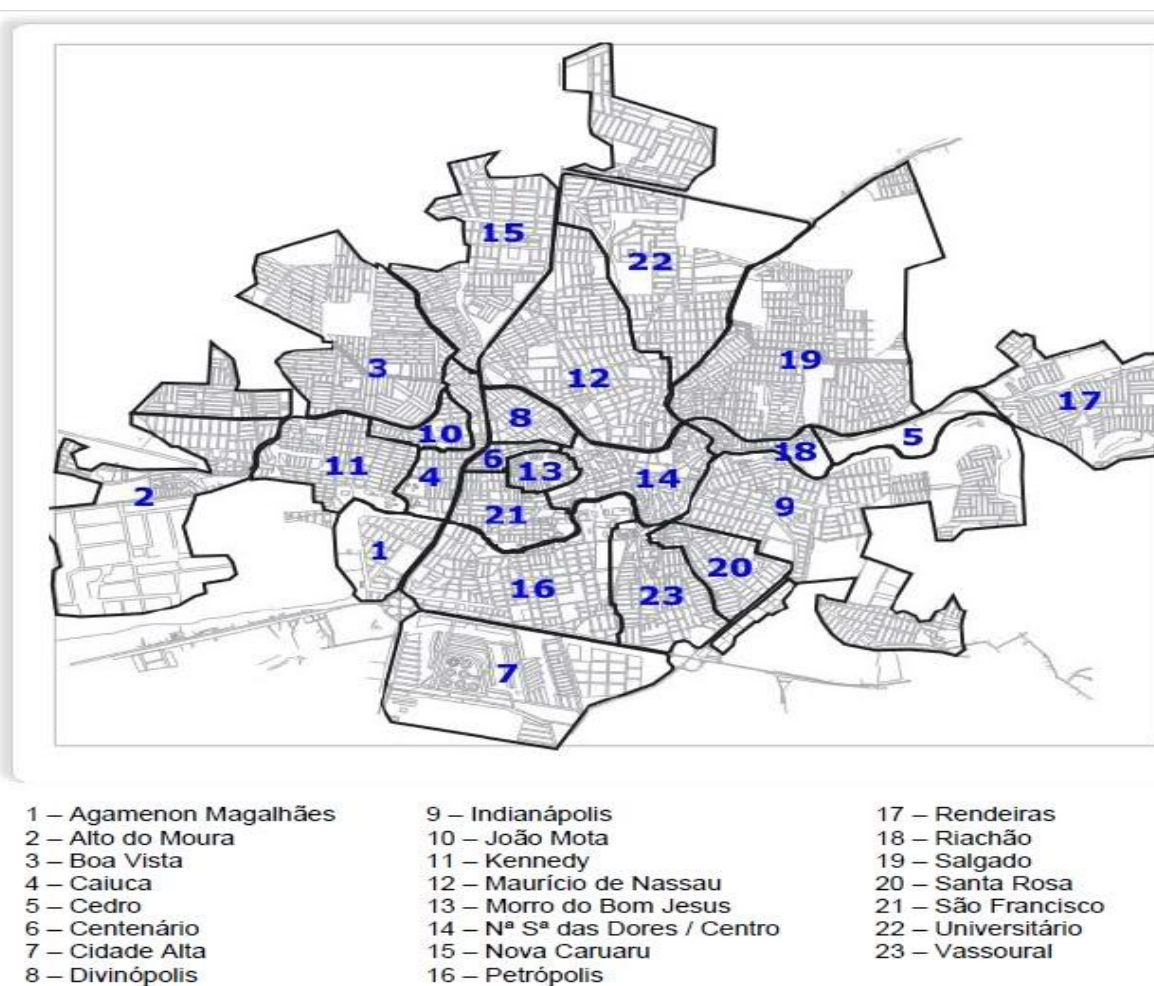
- **Coleta seletiva Porta a Porta:** o sistema é baseado no recolhimento do resíduo através de veículos dimensionados para tal fim. O lixo pode ser segregado ou não previamente;
- **Coleta Seletiva por Autônomos:** um grupo de trabalhadores autônomos, que podem estar associados a cooperativas de catadores, utilizam de carros de tração manual para a coleta;
- **Pontos de Entrega Voluntária:** locais onde estão disponíveis caçambas, containeres ou conjunto de tambores, identificados para receber os materiais. Na qual o cidadão deposita o material reciclável previamente triado em recipientes para determinados tipos de materiais. São instalados em pontos estratégicos, com grande fluxo de pessoas e de fácil acesso (Brasil, 2001).

3. Situação Político-geográfica da cidade de Caruaru

No presente trabalho consideramos os PEVs como solução para a problemática de gestão dos RS no município de Caruaru.

Segundo dados do IBGE (2014), do censo realizado em 2010, a população estimada da cidade de Caruaru é de 314.912 habitantes (dos quais 276.932 estão localizados na área urbana), cuja área total do município é de 920, 611 km². A Figura 1 e a Tabela 1 mostram, respectivamente, a distribuição dos bairros na cidade e a distribuição da população que reside no perímetro urbano.

Figura 1 - Distribuição geográfica dos bairros na cidade de Caruaru.



Fonte: IBGE (2010)

Tabela 1 - População por bairros na cidade de Caruaru

Nome do bairro	Habitantes
Agamenon Magalhães	5918
Alto do Moura	9261
Boa Vista	34664
Caiuca	5867
Cedro	1713
Centenário	4208
Cidade Alta	5842
Divinópolis	6680
Indianópolis	19443
João Mota	4600
Kennedy	12031
Maurício de Nassau	15506
Morro do Bom Jesus	5481
Nossa Senhora das Dores	8173
Nova Caruaru	7231
Petrópolis	14152
Rendeiras	13675
Riachão	6267
Salgado	51473
Santa Rosa	11734
São Francisco	9734
Universitário	5687
Vassoural	17592
Total geral	276932

Fonte: IBGE (2010)

3.1. Diagnóstico da geração de resíduos sólidos na região do Nordeste e na cidade de Caruaru

Segundo dados da ABRELPE (2013), a quantidade de resíduos sólidos urbanos produzidos por

habitantes na região Nordeste representa 0,959 kg/hab./dia, conforme Tabela 2. O lixo produzido pela população da cidade de Caruaru representa: $276.932 \text{ hab} \times 0,959 \text{ kg/hab./dia} = 265.577,788 \text{ kg/dia}$.

Tabela 2 - Geração de resíduos sólidos por região

Regiões	RSU Gerado em 2012 (Kg/hab./dia)	RSU Gerado em 2013 (Kg/hab./dia)
Norte	0,841	0,892
Nordeste	0,959	0,958
Centro-Oeste	1,113	1,110
Sudeste	1,204	1,209
Sul	0,770	0,761
Brasil	1,037	1,041

Fonte: adaptado de ABRELPE (2013)

Para a divisão do número de áreas, o estudo considerou que cada bairro será dividido pela quantidade de lixo produzido por número de habitantes e o resíduo considerado reciclável: plásticos, papel, metais (alumínio e aço) e vidro. Segundo pesquisas realizadas pelo IPEA (2014), são coletadas 183,5 mil toneladas de resíduos sólidos por dia no Brasil, em 90% do total de domicílios, o que representa 98% das moradias urbanas, mas apenas 33% das rurais. A matéria orgânica representa 51,4% do lixo diário, e apenas 31,9% é composto de material reciclável. Assim para cada bairro foi calculado a geração de resíduos recicláveis, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Geração de resíduos por bairro

Nome do bairro	Resíduo Reciclável (Kg)
Agamenon Magalhães	1810,44
Alto do Moura	2833,13
Boa Vista	10604,44
Caiuca	1794,83
Cedro	524,04

Centenário	1287,19
Cidade Alta	1787,19
Divinópolis	2043,55
Indianópolis	5948,02
João Mota	1407,23
Kennedy	3680,53
Maurício de Nassau	4743,61
Morro do Bom Jesus	1676,75
Nossa Senhora das	2500,29
Dores	
Nova Caruaru	2212,11
Petrópolis	4329,39
Rendeiras	4183,46
Riachão	1917,20
Salgado	15746,67
Santa Rosa	3589,67
São Francisco	2977,83
Universitário	1739,77
Vassoural	5381,76
Total geral	84630,97

Fonte: Autor

3.2. Cálculo do número de PEVs

Para o cálculo do número de PEVs, a metodologia utilizada foi baseada no estudo realizado por Peixoto (2006) que define por meio da equação (1) uma estimativa para dimensionar a quantidade máxima de PEVs a ser instalada:

$$NPEV = \frac{Qrt}{Cc \cdot f} \quad (1)$$

Onde:

NPEV: número de PEVs a serem instalados;

Qrt: quantidade de recicláveis gerada semanalmente, em toneladas;

Cc: capacidade do container, em toneladas;

f: frequência de coleta, em vezes por semana.

De acordo com pesquisas entre fabricantes de contêineres, a capacidade volumétrica varia entre 1.000 L e 2.500L, com uma carga de 1,38t, segundo um dos fabricantes dos contêineres COLECT VITÓRIA (2005), porém as capacidades podem variar conforme o fabricante.

Para o cálculo da quantidade máxima de PEVS, adotou-se a sua capacidade máxima de armazenamento de resíduos recicláveis. A Tabela 4 apresenta a quantidade máxima de PEVS que deveria ser instalada na cidade de Caruaru. De acordo com os cálculos apresentados, são necessários 55 PEVs para atender a todo o lixo seletivo produzido pela população, porém sabe-se que grande parte do lixo que é gerado não possui um descarte correto pela população e que a instalação de tantos PEVs seria inviável para o poder público. Com base no resultado apresentado, foi desenvolvido um modelo matemático buscando-se maximizar o potencial de lixo seletivo coletado, levando-se em conta os custos de instalação dos PEVs assim como os custos de coleta do lixo. Esse modelo é apresentado na próxima seção.

Tabela 4 - Quantidade máxima de PEVs calculados

Nome do bairro	Quantidade de PEVs
Agamenon Magalhães	1
Alto do Moura	2
Boa Vista	8
Caiuca	1
Cedro	1
Centenário	1
Cidade Alta	1
Divinópolis	1
Indianópolis	4
João Mota	1
Kennedy	2
Maurício de Nassau	3
Morro do Bom Jesus	1
Nossa Senhora das Dores	2
Nova Caruaru	2

Petrópolis	3
Rendeiras	3
Riachão	1
Salgado	11
Santa Rosa	3
São Francisco	2
Universitário	1
Vassoural	4
Total geral	55

Fonte: Autor

4. Modelagem matemática para cálculo dos PEVs necessários.

O modelo matemático apresentado a seguir foi construído com base no modelo proposto por Schittekat *et al.* (2013) para seleção de pontos de parada de ônibus escolares. No atual modelo, os pontos de parada de ônibus foram substituídos por pontos de localização dos PEVs; os ônibus foram substituídos por caminhões de coleta de lixo; e os alunos foram substituídos por centros populacionais. A função objetivo, assim como algumas restrições do modelo original, foram incluídas, modificadas ou excluídas para a adaptação do modelo original ao problema trabalhado. O modelo alterado é apresentado conforme a seguir:

Dado que:

Np é o número de locais potenciais para instalação dos PEVs;

i é o índice utilizado para indicar um possível ponto de coleta, $0 \leq i \leq Np$;

$i = 0$ representa o índice para o centro de reciclagem;

n é o número máximo de caminhos (ou rotas) utilizados;

k é o índice utilizado para indicar um caminhão, $1 \leq k \leq n$;

c é valor médio por unidade de lixo reciclado;

I representa o investimento permitido para instalação dos PEVs;

C representa o custo de instalação de um único PEV;

$NIPEV = \text{int}(I/C)$ representa o número máximo de PEVs que podem ser instalados;

CK representa a capacidade do caminhão coletor (em números de PEVs);

CP representa a capacidade do PEV (em toneladas de lixo);

F_{ext} representa o fator de extrapolação, ou o valor pelo qual o volume máximo de lixo de cada PEV será multiplicado indicando a quantidade máxima de lixo produzido destinado ao PEV;

Nc é o número de centros populacionais considerados;

l é o índice utilizado para indicar um centro populacional, $0 \leq l \leq Nc$;

L_i é o lixo produzido pelo centro populacional l ;

V representa o conjunto dos pontos potenciais de alocação dos PEVs;

E representa o conjunto de arcos (ou trechos) entre os pontos potenciais;

S representa o conjunto de centros populacionais que devem ser atendidos pelos PEVs;

C_{ij} o custo relacionado ao arco (trecho) entre os pontos i e j ;

S_{il} é 1 se o centro populacional l pode ser atendido por um PEV alocado no ponto i ;

x_{ijk} tem valor 1 se o caminhão k atravessa o trecho do ponto i para o ponto j e 0 caso contrário;

y_{ik} tem valor 1 se o caminhão k visita o ponto i (onde será alocado um dos PEVs), e 0 caso contrário;

Z_{ilk} tem valor 1 se o lixo produzido pelo centro populacional l é pego pelo caminhão k no ponto i .

A formulação matemática do problema será dada por:

$$\max \left(c \times \sum_{i \in S} \left(L_i \times \min \left\{ 1, \sum_{i \in V} \sum_{k=1}^n Z_{ilk} \right\} \right) - \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \left(C_{ij} \sum_{k=1}^n X_{ijk} \right) \right) \quad (2)$$

Sujeito à:

$$\sum_{j \in V} X_{ijk} = \sum_{j \in V} X_{jik} = Y_{ik} \quad \forall i \in V, \quad k = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i,j \in Q} X_{ijk} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \subseteq V \setminus \{v_o\}, \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n Y_{ik} \leq 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^n Z_{ilk} \leq S_{il} \quad \forall l \in S, \quad \forall i \in V \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V} Y_{ik} \leq CK \quad k = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$Z_{ilk} \leq Y_{ik} \quad \forall i, l, k \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{l \in S} Z_{ilk} L_l \leq F_{ext} CP \quad \forall i \in V \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{k=1}^n Y_{ik} \leq NIPEV \quad (10)$$

$$Y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, \quad k = 1, \dots, n \quad (11)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, \quad i \neq j, \quad k = 1, \dots, n \quad (12)$$

$$Z_{ilk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V, \quad i \neq j, \quad l \in S \quad (13)$$

Onde a função objetivo (2) busca maximizar o lucro obtido no percurso da coleta (lucro obtido pelo lixo coletado menos o custo relativo ao percurso percorrido pelos caminhões coletores). A restrição (3) indica que se o caminhão visita o ponto , então deve haver um arco (ou rota) percorrido pelo caminhão que chega ao ponto e um arco percorrido pelo caminhão que sai do ponto . A restrição (4) determina que deve haver uma conectividade entre as rotas percorridas pelo caminhão . Essa mesma restrição impede que sejam formados circuitos nos quais o ponto

de origem não esteja incluso. A restrição (5) indica que apenas um caminhão poderá atender cada ponto. A restrição (6) garante que o lixo produzido por cada centro populacional será recolhido em um ponto que atenda ao centro populacional. A restrição (7) garante que o número de PEVs recolhidos por cada caminhão não exceda a sua capacidade. A restrição (8) indica que, se o caminhão visita o ponto, então o lixo produzido pelo centro populacional poderá ser recolhido pelo caminhão no ponto. A restrição (9) garante que o lixo total produzido pelos centros populacionais atendidos pelo ponto, não exceda a uma determinada quantidade. A restrição (10) limita o número de PEVs instalados devido às restrições de investimento. As restrições em (11), (12) e (13) definem a natureza das variáveis de decisão (binárias).

Com relação ao modelo original as seguintes modificações foram realizadas:

- A função objetivo foi alterada de forma a maximizar o lucro potencial do lixo coletado ao mesmo tempo em que o custo de roteamento é minimizado;
- A restrição (7) foi incluída de forma a garantir que o número de PEVs atendidos por um caminhão não ultrapasse a sua capacidade;
- A restrição (9) foi acrescentada de forma a garantir que um PEV não receba mais lixo do que uma determinada quantidade definida em função de sua capacidade;
- A restrição (10) foi acrescentada de forma que o recurso necessário para instalação dos PEVs não ultrapasse o investimento permitido para tal finalidade.
- A restrição (6) do modelo proposto por Schittekat *et al.* (2013) foi desconsiderada porque os centros populacionais podem depositar seus respectivos resíduos em diferentes pontos de localização de PEVs desde que os pontos atendam aos centros populacionais em questão;
- A restrição (8) do modelo proposto por Schittekat *et al.* (2013), foi descartada pois no presente trabalho não se deseja garantir que todos os centros populacionais sejam atendidos;
- considera-se que a capacidade do caminhão está diretamente relacionada ao número máximo de PEVs (pontos de localização) que o caminhão pode atender.

4. Conclusão e recomendações para trabalhos futuros

Buscando auxiliar na problemática relacionada à geração dos resíduos urbanos, o presente trabalho apresentou um levantamento da atual situação da gestão de resíduos sólidos no Brasil e, mais especificamente, no município de Caruaru. Com os dados obtidos, foi diagnosticado que os três bairros que necessitam de maior intervenção, com a adoção de políticas públicas, em função de uma maior geração de resíduos são: Salgado, Boa Vista e Indianópolis. Isto sugere que campanhas de educação ambiental devam ser priorizadas nesses bairros, buscando a conscientização da população, como um primeiro passo para que se obtenha êxito no programa. Por outro lado, campanhas de distribuição de bonificações, como incentivos fiscais ou premiações, são fatores primordiais para a mudança cultural, tão presente em países desenvolvidos.

Como possível solução para localização dos PEVs, foi realizado um cálculo da quantidade necessária para atender a produção potencial de lixo reciclável e conseqüentemente auxiliar na instalação dos PEVs. Contudo, foi identificado que a instalação da quantidade estimada para o porte da cidade seria inviável, inclusive devido a questões orçamentárias. Tendo em vista essa limitação foi proposto um modelo matemático para seleção dos pontos de localização dos PEVs. Nesse modelo buscou-se maximizar o lucro potencial da coleta, levando-se em conta o custo da rota de coleta assim como o investimento permitido para instalação dos PEVs. Uma das dificuldades encontradas foi relacionada a validação do modelo, tendo em vista sua natureza não linear assim como sua complexidade (relacionada ao número de variáveis de decisão e restrições). Assim sendo para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do modelo e a comparação dos seus resultados com vistas à instalação dos PEVs, como também a avaliação da participação popular no processo de tomada de decisão na gestão dos resíduos sólidos.

Como passo seguinte, sugere-se a instalação dos PEVs próximo aos referidos bairros, cuja localização específica deve ser baseada nos resultados apontados pela aplicação do modelo matemático, garantindo a viabilidade técnica-econômica da ação.

5. REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010**, São Paulo, Grappa, 2010, 199p.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013**. Disponível em:
<<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>>

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 275, de 25 de abril de 2001. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 19 jun. 2001.

COLECT VITÓRIA (diretoria@colect.com.br) **Re: Dúvida – tipos contentores**. E-mail para PEIXOTO, K. (kakapeixoto@yahoo.com.br) [mensagem capturada em 13 dez. 2005]

CEMPRE. Review 2013. **Panorama de Reciclagem**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>> acesso em 04/02/2015.

DIAS, Sônia Maria. **Coleta Seletiva e Inserção Cidadã: A Parceria Poder Público/Asmare**. In: JACOBI, P. (Org.). *Gestão compartilhada dos resíduos sólidos no Brasil: inovação com inclusão social*. São Paulo. Annablume. 2006. p. 65-86.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico: Cidades. 2014**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=260410>> acesso em: 07/09/2014.

IPEA - Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=13932> acesso em: 11/11/2014.

PEIXOTO, K. Campos, M. A. D'Agosto. **"Localização de Equipamentos para Coleta Seletiva de Lixo Reciclável em Área Urbana."** *2º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento, Urbano, Regional, Integrado, Sustentável*. 2006.

SCHITTEKAT, Patrick; Joris Kinable; [et al.]. **A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection**. *European Journal of Operational Research*. 2013.

TADEU, Ferreira Braga; SILVA J. T. Moreira; BOACHAT, Cláudio Bruzzi, CAMPOS, Paulo M. S.; PEREIRA André L. **Logística Reversa e Sustentabilidade**– São Paulo: Cengage Learning, 2013.