

## MODELAGEM MATEMÁTICA PARA LOCALIZAÇÃO DE UNIDADES DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE: UMA APLICAÇÃO NO INTERIOR DO ESTADO DE SÃO PAULO

Daniela Bacchi Bartholomeu<sup>a\*</sup>, José Vicente Caixeta-Filho<sup>a</sup>,  
Carlos Eduardo Osório Xavier<sup>a</sup>, José Eduardo Holler Branco<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universidade de São Paulo (USP-ESALQ), Piracicaba – SP, Brasil

<sup>b</sup>Citrosuco, Piracicaba – SP, Brasil

### Resumo

O planejamento da logística de tratamento de resíduos de serviços de saúde – RSS merece atenção cuidadosa devido aos riscos inerentes desses resíduos à saúde e ao meio ambiente. Um diagnóstico da cadeia de logística de tratamento de RSS foi realizado para que se pudesse desenvolver uma ferramenta de planejamento de apoio aos agentes dessa cadeia. Segundo dados do IBGE (2002), mais de 30% dos municípios brasileiros não tratam seus RSS. Em face das oportunidades representadas por essa demanda reprimida, esse artigo propõe um modelo matemático de programação inteira-mista – MIP para indicar localizações ótimas de novas unidades de tratamento de RSS. O modelo proposto utiliza dados do interior do estado de São Paulo, maior estado gerador de RSS. Foram considerados sete cenários para checar a consistência das recomendações de localização. Em cada cenário, são flexibilizadas as capacidades de processamento ou número de unidades de tratamento. Os resultados variam conforme o cenário analisado, mas, em geral, indicam soluções que podem ser divididas em dois grupos. Quando somente a capacidade de processamento varia, os municípios mais frequentemente apontados pelo modelo são Bauru, Piracicaba e Campinas. Por outro lado, quando permite-se implantar mais de uma unidade de tratamento, mantendo-se a capacidade de processamento constante, os municípios de São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Salto de Pirapora destacam-se como soluções ótimas. De qualquer modo, uma vez que a infraestrutura de tratamento de RSS paulista encontra-se concentrada na região metropolitana de São Paulo, evidencia-se, assim, oportunidades para instalação de novas unidades no interior do estado, que possam contribuir para redução de custos logísticos da cadeia de tratamento de RSS paulista.

Palavras-chave: resíduo de serviços de saúde - RSS, logística, MIP.

### Abstract

Planning the logistics health services wastes – HSW deserves careful attention due to the inherent risks of such wastes to health and the environment. A diagnosis of the HSW supply chain treatment was performed in order to support the development of a planning tool useful to this chain. According to data from IBGE (2002) over 30% of Brazilian cities do not treat their HSW. In view of the opportunities represented by this demand not attended, this study proposes a mixed-integer programming - MIP model to indicate the optimum locations for new HSW treatment units. The proposed model uses data from the state of Sao Paulo, the largest producing state of HSW. Seven scenarios are considered to check the consistency of the location results. Each scenario has different processing capabilities of the units and total number of treatment units. The results depend on the scenario evaluated, but in general, indicate that solutions can be divided into two groups. When only the processing capacity varies, cities most often identified by the model are Bauru, Campinas and Piracicaba. On the other hand, when allowed to deploy more than one treatment unit, the counties of São José do Rio Preto, Ribeirão Preto and Salto de Pirapora are highlighted as optimal solutions. Anyway, once the infrastructure treating HSW São Paulo state is concentrated in the metropolitan area of São Paulo city, it is evident, therefore, opportunities for the installation of new units within the state, contributing to reduce logistics costs treatment of the HSW treatment in the state.

Keywords: health services wastes–HSW, logistics, mixed-integer programming–MIP.

\*Autor para correspondência: e-mail: [daniela.bartholomeu@usp.br](mailto:daniela.bartholomeu@usp.br)

### 1. Introdução

Resíduos de Serviços de Saúde – RSS são aqueles originados de qualquer atividade de natureza médico-assistencial humana ou animal (tais como clínicas odontológicas, veterinárias, farmácias, centros de pesquisa), farmacologia e saúde, ou aqueles compostos por medicamentos vencidos, necrotérios, funerárias, medicina legal e barreiras sanitárias.

Os RSS representam um potencial de risco para a saúde de quem manipula esse tipo de resíduo e para o meio ambiente, como decorrência de sua destinação inadequada. O risco no manejo está vinculado especialmente aos acidentes que ocorrem devido às falhas no acondicionamento e segregação dos materiais perfuro-cortantes sem utilização de proteção mecânica. Com relação ao meio ambiente, há riscos de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, além do risco de contaminação do ar, quando os RSS são incinerados em unidades sem controle, emitindo poluentes, tais como dioxinas e furanos para a atmosfera.

Conseqüentemente, os RSS merecem atenção especial em todas as suas fases de manejo, desde a segregação, passando pelo acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, até o tratamento e disposição final.

No Brasil, a RDC ANVISA nº 306/04 (ANVISA 2004) e a Resolução CONAMA nº 358/05 (CONAMA, 2005) constituem o escopo legal que rege as definições e práticas relativas aos RSS no presente. Versam sobre o gerenciamento dos RSS em todas as suas etapas, definindo a conduta dos diferentes agentes da cadeia de responsabilidades pelos RSS. Segundo a ANVISA (2006, p.17), “refletem um processo de mudança de paradigma no trato dos RSS, fundamentada na análise dos riscos envolvidos, em que a prevenção passa a ser eixo principal e o tratamento é visto como uma alternativa para dar destinação adequada aos resíduos com potencial de contaminação”. Com isso, exigem que os resíduos

recebam manejo específico, desde a sua geração até a disposição final, definindo competências e responsabilidades para tal.

Mais especificamente, a Resolução CONAMA nº 358/05 aborda o gerenciamento sob a ótica da preservação dos recursos naturais e do meio ambiente, promovendo a competência aos órgãos ambientais estaduais e municipais para estabelecerem critérios para o licenciamento ambiental dos sistemas de tratamento e destinação final dos RSS. Já a RDC ANVISA nº 306/04 enfoca a regulação no controle dos processos de segregação, acondicionamento, armazenamento, transporte, tratamento e disposição final, estabelecendo procedimentos operacionais em função dos riscos envolvidos.

Os RSS potencialmente perigosos, químicos e perfurocortantes (Grupo A, B e E, respectivamente) devem ser desinfectados química ou termicamente, para posterior disposição final. Entretanto, verifica-se que ainda há uma lacuna significativa entre a geração e a correta destinação de RSS, predominando, ainda, a queima a céu aberto.

Neste sentido, este artigo teve como principal objetivo a identificação das localidades ótimas para a instalação de unidades de tratamento de RSS no estado de São Paulo, já que a infraestrutura existente no estado encontra-se concentrada nas proximidades de grandes municípios geradores. Para tanto, foi desenvolvido um modelo matemático de programação binária, sendo analisados sete cenários combinando diferentes números de unidades de tratamento e capacidades de processamento a serem instaladas.

Em vista disso, ao desenvolver um modelo matemático de otimização baseado em programação inteira mista que atende aos objetivos citados, o artigo apresenta importantes contribuições de natureza metodológica. Ademais, também contribui para a discussão de cunho aplicado, uma vez que fornece soluções baseadas em cenários críveis de alternativas de tratamento que devem reduzir custos logísticos de tratamento de RSS.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. *Caracterização da geração, tratamento e disposição de RSS no Brasil*

Apesar de os Resíduos de Serviços de Saúde - RSS representarem apenas entre 1% e 3% do total de resíduos sólidos gerados no Brasil, a atenção e o cuidado destinados ao seu correto gerenciamento estão ligados ao risco potencial que estes representam à saúde e ao meio ambiente. Ademais, ainda é fato que pouquíssimos municípios no território nacional gerenciam adequadamente os RSS, mesmo contando com um aparato legal específico para tal. Mesmo naqueles municípios que possuem um sistema específico de gerenciamento para os RSS já implementado, a ANVISA (2006) destaca que vários deles apresentam graves deficiências ou estão focados apenas nos hospitais e postos de saúde municipais.

Conforme as resoluções federais, é dos geradores a responsabilidade pelo tratamento e pela destinação final dos RSS. Uma vez que as unidades de saúde podem ser públicas ou privadas, as características da coleta e destinação desse tipo de resíduo podem variar (e, de fato, variam) entre os municípios. Em grande parte das cidades, o município acaba realizando a coleta e destinação apenas dos resíduos gerados por estabelecimentos públicos de saúde, não incluindo aqueles advindos de unidades privadas. Conseqüentemente, a coleta de RSS executada por grande parte dos municípios brasileiros acaba sendo apenas parcial e geralmente restrita aos resíduos gerados nos estabelecimentos de saúde municipais, representando, assim, apenas uma parcela da geração total de RSS.

Como conseqüência, o levantamento de informações mais apuradas sobre a quantidade total, assim como o destino dos RSS gerados no Brasil, é severamente prejudicado. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, criada em 1976 para “promover o desenvolvimento técnico-operacional do setor de limpeza pública e gestão de resíduos sólidos”, é uma das instituições que realiza e

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

publica, anualmente, um levantamento de informações relacionadas aos RSS no país. Em sua pesquisa mais recente, realizada junto a 364 municípios, a ABRELPE (2009) destaca que os dados levantados restringem-se, usualmente, aos resíduos gerados nas unidades públicas. Os dados dos demais geradores somente estão considerados no caso de municípios que assumiram a responsabilidade pela gestão dos resíduos gerados pelos demais estabelecimentos. Além disso, reforça o fato de que ainda existem municípios que não realizam a coleta de RSS, diferentemente do que ocorre com a coleta de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, que é realizada em todos os municípios brasileiros.

Conforme dados da ABRELPE (2009), foram coletados cerca de 221 mil toneladas de RSS no país em 2009, sendo que a região Sudeste respondeu por quase 70% desse total. Por outro lado, o país possui uma capacidade instalada para tratamento deste tipo de resíduo de cerca de 210,5 mil toneladas anuais, indicando que, de fato, a oferta de infraestrutura para tratamento ainda é inferior à necessidade (Tabela 1).

Tabela 1. Capacidade Instalada de Tratamento de RSS (t/ano)

Macrorregião	Autoclave		Incineração		Microondas		Total	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Norte	-	-	1.248	1.248	-	-	1.248	1.248
Nordeste	5.304	5.304	16.723	16.723	-	-	22.027	22.027
Centro-Oeste	936	3.120	7.800	8.299	-	-	8.736	11.419
Sudeste	45.864	69.841	26.114	27.612	47.112*	47.112*	119.090	144.565
Sul	10.670	22.464	1.404	4.992	2.184	3.744	14.258	31.200
<b>Brasil</b>	<b>62.774</b>	<b>100.729</b>	<b>53.290</b>	<b>58.874</b>	<b>49.296</b>	<b>50.856</b>	<b>165.360</b>	<b>210.460</b>

\* a estes dados foram somadas 31.200 t/ano que são tratadas por Desativação Eletrotérmica – ETD.  
Fonte: Pesquisa ABRELPE (2009).

Neste mesmo sentido aponta a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB (IBGE, 2002). Com dados relativos ao início dos anos 2000, os resultados desta pesquisa mostram que a maioria dos municípios brasileiros não utiliza um sistema apropriado para

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

coleta, tratamento e disposição final dos RSS. De um total de 5.507 municípios brasileiros pesquisados, apenas 63% realizavam a coleta dos RSS. A maior quantidade de RSS coletada está na região SE, com cerca de 3.130 t/dia. A região NE é a segunda, coletando aproximadamente 469 t/dia. As demais regiões coletam menos de 200 t/dia (Figura 1).

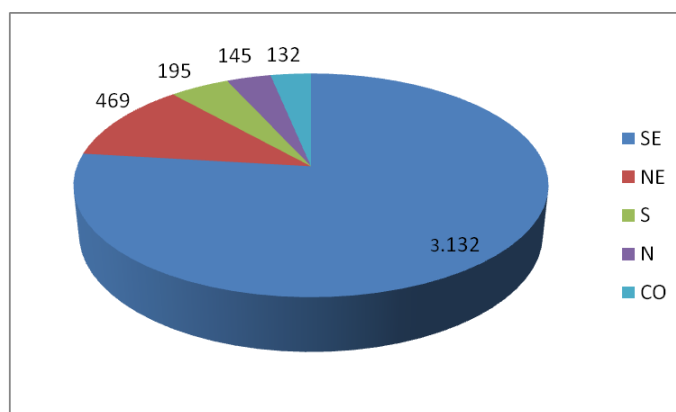


Figura 1. Volume de RSS coletado, por região do Brasil (em t/dia)  
Fonte: IBGE (2002), apud ANVISA (2006).

É importante destacar que mais de 30% dos municípios brasileiros ainda não realizam o tratamento do resíduo de saúde. Dentre aqueles que possuem alguma forma de tratamento, ainda predomina a queima a céu aberto (cerca de 30%), seguida da incineração (17%). As tecnologias de microondas e autoclave para desinfecção dos RSS são adotadas somente por 6% dos municípios (IBGE, 2002).

Apesar das normas federais aplicáveis aos RSS “estabelecerem que determinadas classes de resíduos de serviços de saúde necessitam de tratamento previamente à sua disposição, alguns municípios encaminham tais resíduos para locais de destinação final (aterros sanitários, aterros controlados e lixões) sem realizar prévio tratamento dos mesmos, o que além de ser contrário às normas, apresenta risco à saúde pública, aos trabalhadores e à população” (ABRELPE, 2009).

Dados mais recentes desenvolvidos pelas projeções da ABRELPE (2010) destacam que a coleta de RSS de grande parte dos municípios ainda é parcial, o que dificulta a elaboração de estatísticas mais precisas sobre a quantidade total e o destino dos RSS gerados no Brasil. De qualquer maneira, ela estima que cerca de 32% dos municípios brasileiros destinam seus RSS para incineração, 15% para tratamento em autoclave e 7,8% para tratamento em microondas. Por outro lado, aproximadamente 15% dos municípios ainda depositam seus RSS em lixões e 2,5% em valas sépticas (ABRELPE, 2010). A Figura 2 sumariza os resultados desta pesquisa.

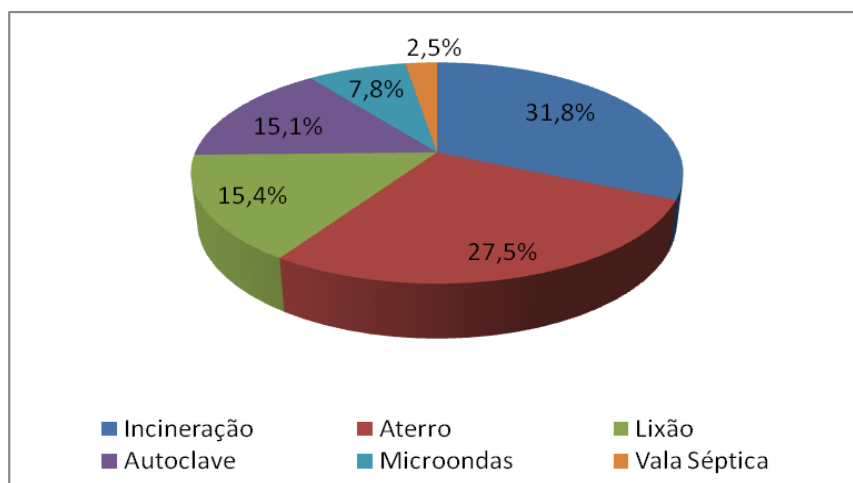


Figura 2 – Destino Final dos RSS coletados pelos municípios (%)  
Fonte: ABRELPE (2010).

## 2.2. Caracterização da geração, tratamento e disposição de RSS na Região Sudeste

Na região Sudeste, a geração, o tratamento e a destinação dos RSS refletem um panorama diferente do observado no nível nacional, conforme será exposto nesta seção. Se por um lado, esta região se destaca como uma grande geradora de RSS, por outro, apresenta melhores índices de tratamento e disposição, além de maior oferta de infraestrutura para tratamento.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

A região Sudeste coleta, anualmente, cerca de 153 mil toneladas de RSS, sendo que o estado de São Paulo representa quase 60% deste total, o que lhe resulta na maior taxa de geração por habitante do país (aproximadamente 2,9 kg/hab/ano) (ABRELPE, 2009).

Com relação à infraestrutura de tratamento, o Sudeste conta com uma capacidade instalada capaz de processar 144,5 mil toneladas anuais. Quase metade da capacidade instalada diz respeito à tecnologia de autoclave para desinfecção dos resíduos de serviço de saúde. O sistema de microondas é a tecnologia com a segunda maior capacidade instalada, seguido pela incineração (cerca de 32% e 20%, respectivamente) (Tabela 2).

Tabela 2 – Capacidade instalada de tratamento de RSS na região Sudeste (t/ano)

<b>Tecnologia</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>crecimento</b>
Autoclave	45.864	69.841	52,3%
Incineração	26.114	27.612	5,7%
Microondas	47.112	47.112	0,0%
<b>Total</b>	<b>119.090</b>	<b>144.565</b>	<b>21,4%</b>

Fonte: ABRELPE (2009).

É interessante destacar que a infraestrutura de tratamento de RSS existente na região Sudeste está bastante concentrada em São Paulo, conforme destacado na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo da capacidade instalada de tratamento de RSS na região Sudeste e no estado de São Paulo (t/ano)

	<b>Autoclave</b>	<b>Incineração</b>	<b>Microondas</b>	<b>Total</b>
São Paulo	44.195	11.232	45.552*	100.979
Total Região SE	69.841	27.612	47.112	144.565
% SP/região SE	63%	41%	97%	70%

\* a estes dados foram somadas 31.200 t/ano que são tratadas por Desativação Eletrotérmica – ETD.  
Fonte: Pesquisa ABRELPE (2009).

O estado de São Paulo possui uma capacidade instalada de tratamento de aproximadamente 100 mil toneladas anuais de RSS, o que corresponde a 70% da capacidade da região SE e a quase 50% da capacidade instalada do Brasil. De toda a tecnologia



## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

instalada no estado, mais de 90% correspondem ao tratamento via microondas e autoclave.

O restante da capacidade instalada é composto por unidades de tratamento via incineração.

Esta distribuição da infraestrutura acaba sendo proporcional à importância do estado na geração de RSS. Assim, o estado apresenta capacidade para tratar basicamente todo o RSS gerado em seus municípios. O gargalo, entretanto ocorre devido ao fato desta infraestrutura estar concentrada nas proximidades dos maiores municípios do estado, tais como a região metropolitana de São Paulo e Campinas (Tabela 4). Conseqüentemente, há uma carência de unidades em regiões do interior do estado, tais como o noroeste e sudoeste paulista, e os RSS gerados nestas regiões devem percorrer grandes distâncias para serem devidamente tratados antes de sua disposição final (Figura 3).

Tabela 4 – Distribuição municipal da capacidade instalada de tratamento de RSS no estado de São Paulo

<b>Município</b>	<b>Mesorregião paulista</b>	<b>Participação na capacidade instalada do estado</b>
São Paulo	Metropolitana de São Paulo	31,8%
Mauá	Metropolitana de São Paulo	24,8%
Paulínia	Campinas	6,3%
Santos	Metropolitana de São Paulo	6,3%
Santana de Parnaíba	Metropolitana de São Paulo	4,8%
Campinas	Campinas	3,8%
Jardinópolis	Ribeirão Preto	3,8%
Moji Mirim	Campinas	3,0%
São José do Rio Preto	São José do Rio Preto	2,8%
Jacareí	Vale do Paraíba Paulista	2,2%
Hortolândia	Campinas	1,9%
São Bernardo do Campo	Metropolitana de São Paulo	1,9%
Sorocaba	Macro Metropolitana Paulista	1,3%
Santo André	Metropolitana de São Paulo	1,3%
Guará	Ribeirão Preto	1,0%
Presidente Prudente	Presidente Prudente	0,9%
Jaú	Bauru	0,6%
Assis	Assis	0,5%
Araraquara	Araraquara	0,4%
Penápolis	Araçatuba	0,3%
Ribeirão Preto	Ribeirão Preto	0,3%

Fonte: Elaborados pelos autores com base em coleta de dados primários, Secretaria Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2007) e Cetesb (2009).

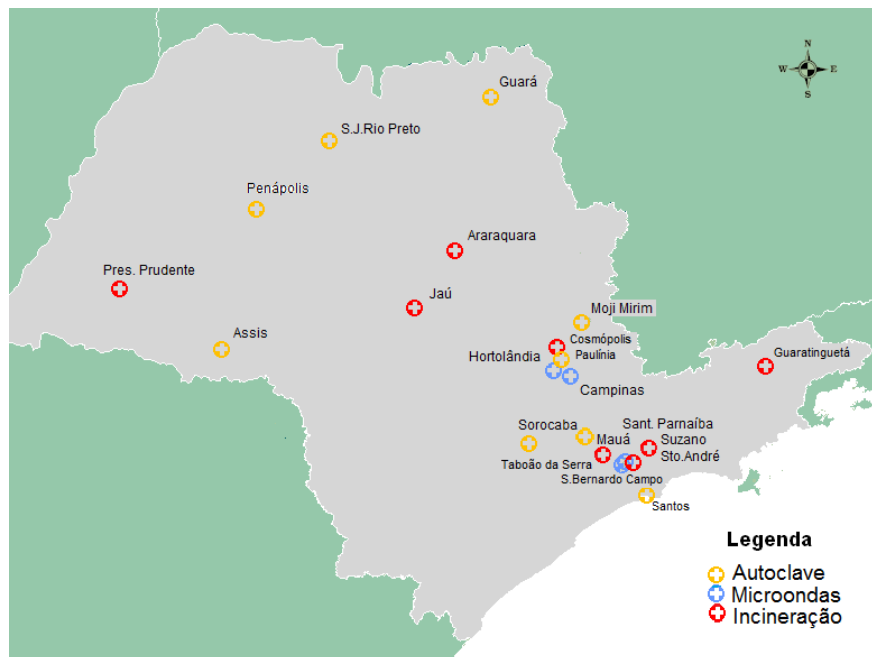


Figura 3 – Unidades de tratamento de RSS no estado de São Paulo  
 Fonte: Elaborado pelos autores

### 3. Material e Método

A localização de estruturas logísticas é um elemento crítico no plano estratégico de empresas. As ramificações da instalação das estruturas são fundamentalmente baseadas em variáveis estruturais, de longo-prazo, as quais impactam nas decisões operacionais e de logística. Os altos custos associados à aquisição de propriedades e à construção da infraestrutura fazem com que a localização da estrutura seja determinante para o sucesso da operação por longos períodos de tempo. Conseqüentemente, os tomadores de decisão devem selecionar locais bem situados para as condições atuais e ao longo da existência da estrutura.

ReVelle e Eiselt (2005) destacam como questão fundamental da estruturação dos problemas de localização, a análise dos pontos de vista e interesses determinantes na solução dos problemas de localização.

As teorias relacionadas a problemas de localização têm como objetivo estabelecer o local ideal de uma estrutura logística, em geral, sob o ponto de vista do sistema. As principais variáveis de estudos de localização citadas por Bowersox e Closs (2001) e

consideradas nesse trabalho foram: i) número de estruturas a serem instaladas; ii) locais candidatos para a instalação das estruturas; iii) canais e custos logísticos envolvidos no acesso as estruturas.

A análise simultânea dessas variáveis requer técnicas específicas, já que há forte interdependência entre as mesmas, tornando inadequadas análises de forma seqüencial ou segmentadas. Hamad (2006), em estudo de ampla revisão sobre modelos de localização constatou a predominância do uso de modelos de programação linear inteira mista (MIP) para resolução desses problemas.

Os problemas de localização usando modelos MIP geralmente são variações dos modelos de transporte (LOPES, 1997) e possuem o objetivo de calcular os mínimos custos de transporte e investimentos envolvidos, obedecendo às restrições de produção, capacidade das instalações e de atendimento a uma determinada demanda.

Problemas de localização reais, em geral, envolvem um grande volume de dados. Como os dados necessários geralmente não estão estruturados, um grande tempo dos estudos de localização é gasto em sua coleta, organização e estruturação. Nesse sentido, segundo Francis, Lowe e Tamir (2000), na resolução de problemas de localização reais é recomendável se utilizar da agregação de dados. Tal técnica torna os problemas menos precisos; no entanto, os torna computacionalmente tratáveis. Nesses casos, a análise de cenários torna-se uma ótima solução para a validação de respostas, uma vez que através de mudanças de parâmetros de dados de entrada pertinentes, resultados decorrentes são comparados.

Nesse estudo, através da aplicação de um modelo matemático de programação linear inteira-mista (MIP), buscou-se identificar as localidades ótimas para a instalação de unidades de tratamento de RSS no estado de São Paulo. O modelo matemático desenvolvido baseou-se na evolução do modelo de caráter teórico desenvolvido por Gandolini e Caixeta

Filho (2007). Baseando-se na interpretação de contribuições dos trabalhos de Chang e Wang (1996), Cunha e Caixeta Filho (2002) e Li e Huang (2006) novas contribuições foram incorporadas.

Para a definição dos dados utilizados na modelagem realizou-se uma ampla pesquisa de diagnóstico da cadeia logística do RSS, englobando dados secundários e visitas de campo para coleta de dados primários e percepção de aspectos qualitativos que poderiam ser incorporados à modelagem.

O modelo MIP foi resolvido através do solver Cplex<sup>®</sup>, utilizando-se da plataforma GAMS. Foram analisados sete cenários, considerando capacidades de processamento e número de unidades distintas com objetivo de se validar a robustez das respostas indicadas.

### ***3.1. Modelo matemático desenvolvido***

O objetivo do modelo desenvolvido neste trabalho foi indicar localizações no interior do estado de São Paulo que pudessem maximizar a receita potencial auferida por novas unidades de tratamento de RSS em conjunto com a minimização dos custos logísticos de todo o sistema de tratamento de resíduos no estado. A função objetivo foi descrita como a maximização do valor da diferença entre receita da empresa e os custos logísticos do sistema de alocação de RSS no estado de São Paulo. Essa perspectiva de objetivo de modelagem representa as estratégias de negócio de uma nova empresa iniciando de forma pouco agressiva quanto à alteração da realocação de fluxos da concorrência que já está instalada. Os interesses da nova empresa são atendidos pela maximização da diferença entre suas receitas e seus custos logísticos. Os interesses dos proprietários da infraestrutura de tratamento de RSS já instalada são atendidos pela maximização do negativo dos custos logísticos atuais, ou seja, a minimização desses custos.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Dessa forma, os custos logísticos da nova unidade de processamento, a oferta de resíduo, o potencial de receita decorrente da prestação de serviço de processamento de RSS e a alteração de custos logísticos dos concorrentes serão preponderantes para a localização da nova unidade de tratamento.

As restrições que devem ser satisfeitas para se atingir os objetivos da modelagem considerada se referem ao tratamento de todo o RSS gerado no estado de São Paulo. Considera-se também o processamento de uma quantidade mínima de resíduos pela nova unidade a ser instalada e que toda a infraestrutura de tratamento de RSS não receba ou realize o tratamento de uma quantidade de resíduos maior que sua capacidade nominal.

A representação formal do modelo matemático desse estudo é feita pelas Equações (1) a (10). A Eq. (1) apresenta a função objetivo do problema a qual é a maximização do lucro das unidades de tratamento de RSS.

$$\text{MaxLUCRO} = \text{RECEITA} - \text{CUSTO} \quad (1)$$

A receita total das novas unidades de tratamento, representada na Eq. (2), é calculada pelo produto do valor recebido pelo tratamento de cada tonelada de RSS ( $P$ ) e a quantidade total de RSS tratado nas novas unidades. O somatório dos fluxos de RSS ( $Qn_{cn}$ ) das diferentes cidades ( $c$ ) enviadas às novas unidades ( $n$ ) define a quantidade total de RSS tratadas nas novas unidades de tratamento.

$$\text{RECEITA} = P \times \sum_{c=1}^{n_c} \sum_{n=1}^{n_n} Qn_{cn} \quad (2)$$

Onde:

$\text{RECEITA}$  = Receita total das novas unidades de tratamento de RSS

$P$  = Preço recebido pelo tratamento de 1 tonelada de RSS

$Qn_{cn}$  = Fluxos de transporte de RSS dos municípios ( $c$ ) às novas unidades de tratamento ( $n$ )

O custo total expresso na Eq. (3) leva em conta as despesas com o transporte de RSS (FRETE) e o custo de instalação de uma nova unidade de tratamento (CONSTRUÇÃO).

$$CUSTO = TRANSPORTE + CONSTRUÇÃO \quad (3)$$

O custo TRANSPORTE (Eq. 4) é calculado pelo somatório do produto entre valor de frete ( $F_{cj}$  em R\$/t) e os fluxos de transporte de RSS entre todas as cidades geradoras de RSS ( $c$ ) e as cidades ( $j$ ) contendo unidades de tratamento de RSS ( $Q_{cj}$ ). As cidades indicadas por  $j$  se referem ao conjunto de todas as cidades que já possuem unidades de tratamento de RSS mais as novas unidades, em novas cidades ( $n$ ).

$$TRANSPORTE = \sum_{c=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_j} F_{cj} \cdot Q_{cj} \quad (4)$$

Onde:

$TRANSPORTE$  = Custo de transporte de RSS para tratamento

$F_{cj}$  = Frete para tratamento de 1 tonelada de RSS, em R\$/t

$Q_{cj}$  = Fluxos de transporte de RSS entre todas as cidades geradoras de RSS ( $c$ ) e as cidades ( $j$ ) que possuem unidades de tratamento de RSS

O custo CONSTRUÇÃO (Eq. 5) é calculado a partir do produto do custo de construção de cada nova unidade de tratamento de RSS ( $CC$ ) pelo número total de unidades criadas, definida pela soma do número de variáveis binárias de localização  $I_n$ . As variáveis indicativas das cidades escolhidas para implantação de novas unidades de tratamento de RSS assumem valor 1.

$$CONSTRU\tilde{C}\tilde{A}O = CC \cdot \sum_{n=1}^{n_n} I_n \quad (5)$$

Onde:

$CONSTRU\tilde{C}\tilde{A}O$  = Custo de construção da unidade de tratamento de RSS

$CC$  = Custo de construção de cada nova unidade de tratamento de RSS

$I_n$  = Variável binária que representa o número total de novas unidades instaladas

As restrições das condições que devem ser respeitadas no problema são representadas nas Equações (6) a (10). A Eq. (6) indica que toda a geração de RSS de cada cidade ( $c$ ) deve ser enviada às unidades de tratamento ( $j$ ).

$$\sum_{j=1}^{n_j} Q_{cj} = Q_{prod_c}, \forall c \in C \quad (6)$$

Onde:

$Q_{prod_c}$  = Geração de RSS de cada cidade “ $c$ ”

As Eq. (7), (8) e (9) indicam que a capacidade de infraestrutura de cada unidade de tratamento existente ( $a$ ) ou nova ( $n$ ) limita o fluxo máximo de recebimento de RSS. A união entre as cidades “ $a$ ” e as cidades “ $n$ ” define as cidades  $j$ .

$$Q_{cj} = Q_{a_{ca}} + Q_{n_{cn}}, \forall c, j, a, n \in B, a \in \Delta, n \in \Phi, X = \Delta \cup \Phi \quad (7)$$

$$\sum_{c=1}^{n_c} Q_{a_{ca}} \leq CAP_a, \forall a \in \Delta \subset X \quad (8)$$

$$\sum_{c=1}^{n_c} Q_{n_{cn}} \leq CAP_n \cdot I_n, \forall n \in \Phi \subset X \quad (9)$$

Onde:

$Q_{aca}$  = Fluxos de RSS dos diferentes municípios (c) enviados às unidades de tratamento existentes (a)

$CAP_a$  = Capacidade de processamento de RSS de cada município (a) que atualmente possui unidade de tratamento

$CAP_n$  – Capacidade de processamento de RSS de cada município (n) que poderá possuir unidade de tratamento

O número máximo de novas usinas é representado pela Eq.(10).

$$\sum_{n=1}^{n_n} I_n \leq NU \quad (10)$$

Onde:

$I_n$  = Variável binária que assume valor “1” para indicar a instalação de uma nova unidade na cidade  $n$  ou assume valor “0” para indicar que a nova unidade não deve ser instalada, ou seja, a localidade continua sem nenhuma unidade instalada

$NU$  = Número de novas usinas que devem ser instaladas

A partir desse modelo, busca-se como resultado, a indicação das variáveis de fluxos entre as cidades e as unidades de tratamento de RSS ( $Q_{cj}$ ). A variável  $I_n$  é a principal resposta para a definição das localidades das novas unidades de tratamento de RSS.

### 3.2. *Dados utilizados*

Os dados necessários para a criação do modelo de localização desse estudo foram definidos conforme a necessidade de entrada e variáveis de saída do modelo matemático representada pela Figura 4.



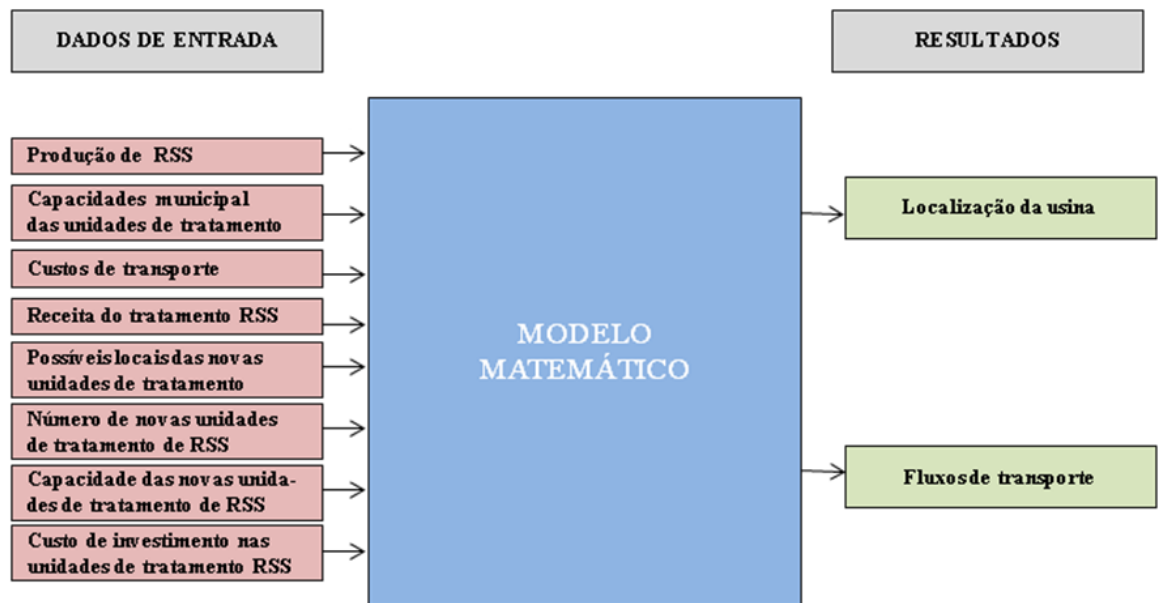


Figura 4 – Representação esquemática do modelo

### *Geração de RSS*

Todas as cidades paulistas foram consideradas como geradoras de RSS nas simulações do modelo desenvolvido nesse estudo. Os valores de produção municipal de RSS utilizados foram baseados em pesquisa em uma amostra pré-selecionada de municípios paulistas. Adicionalmente identificou-se dentre estes municípios um grupo cuja coleta de dados a partir de visita de campo seria importante para o refinamento das informações necessárias para compreensão da cadeia do problema considerado. Ao todo, foram realizadas visitas em 14 municípios; outros 100 municípios foram contatados via telefone. A coleta de dados primários ocorreu entre os meses de setembro e dezembro de 2009. A Tabela 5 sintetiza os resultados quanto ao número de questionários respondidos na pesquisa. A amostra final obtida é corresponde a aproximadamente 30% da geração de RSS no estado de São Paulo.

Tabela 5 – Questionários respondidos

Tipo	Telefone	Visita de campo	Total geral
Aterro		14	14
Empresa de Tratamento		2	2
Prefeitura	24	19	43
Transportadora		7	7
<b>Total geral</b>	<b>24</b>	<b>42</b>	<b>66</b>

Fonte: Dados da pesquisa

Uma vez coletadas as informações durante as visitas de campo, estas foram utilizadas, juntamente com dados secundários disponíveis no SNIS/Ministério das Cidades e no Cidades/IBGE. A regressão linear simples para estimar a geração de RSS, tendo o número de leitos como variável explicativa e considerando intercepto nulo, mostrou-se significativa. Os resultados foram a relação de 0,600078 t de RSS gerados por ano para cada leito adicional criado. Esse valor equivale a uma geração diária por leito de aproximadamente 1,6 kg, o que condiz com a realidade encontrada nas visitas de campo. A distribuição da geração de RSS em São Paulo estimada é apresentada na Figura 5.

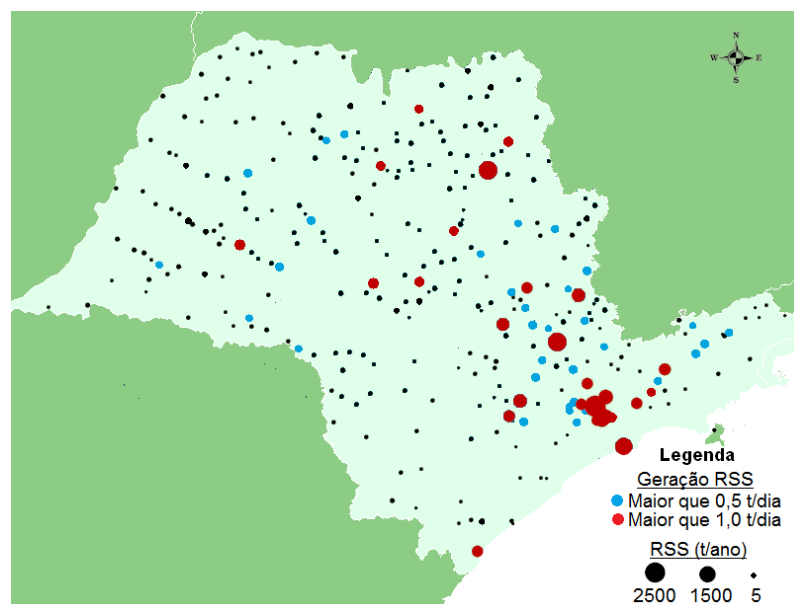


Figura 5 – Distribuição da geração de RSS nos municípios de São Paulo  
 Fonte: Resultados do trabalho

### *Capacidade municipal das unidades de tratamento de RSS*

Para o mapeamento das unidades de tratamento existentes realizou-se um amplo levantamento de dados secundários da ABRELPE (2009, 2010), IBGE (2002) e SECRETARIA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (2009) e de informações a partir de contatos com os agentes do setor. Tais informações foram complementadas e corroboradas com dados primários levantados em campo ou contatos telefônicos realizados. Os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 4. Destaca-se que as cidades identificadas no levantamento não esgotam o universo de unidades de tratamento disponíveis, mas correspondem ao resultado de uma coletânea de informações obtidas a respeito, incluindo as unidades de levantamento mais importantes.

### *Custos de Transporte*

No trabalho, considerou-se que o transporte do RSS é realizado por um caminhão “toco” baú, com uma carga média de 2,5 t. Além disso, considerou-se uma velocidade média de percurso igual a 60 km/h e 2 h para cada operação de carga ou descarga do veículo.

A estimativa dos custos fundamentou-se no método de custeio dos serviços de transporte sugerido por Lima (2003). O custo de transporte é dividido em duas grandes classes de grupos: os custos fixos, que independem do nível de utilização dos ativos e equipamentos de transporte, e os custos variáveis, que são proporcionais à intensidade de uso dos veículos. Os custos fixos são: depreciação, remuneração do capital, pessoal (motorista), custos administrativos, seguro do veículo, IPVA/ seguro obrigatório. Os custos variáveis: pneus; combustível; lubrificantes; lavagem; lubrificação, manutenção e pedágio.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

A partir da aplicação das condições de transporte sugerida, o método apresentado e coleta de valores de mercado realizadas pelo Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG), os custos fixos foram convertidos em um coeficiente de custo fixo (CF) em R\$/h e os custos variáveis convertidos em um coeficiente de custo variável (CV) em R\$/km. Por fim, o valor de frete estimado para cada rota foi calculado a partir das equações:

$$C_{fixo} = \left[ \frac{D}{V} + T \right] \times CF \quad (11)$$

Onde:

$C_{fixo}$  = Custo fixo de transporte de RSS, em R\$

$D$  = Distância média percorrida, em km

$V$  = Velocidade média de percurso, em km/h

$T$  = tempo de carregamento e descarregamento do veículo, em h

$CF$  = coeficiente de custo fixo, expresso em R\$/h. Calculado a partir da depreciação do veículo, remuneração do capital e do motorista, custos administrativos, seguro do veículo, IPVA.

$$C_{variável} = D \times CV \quad (12)$$

Onde:

$C_{variável}$  = Custo variável de transporte de RSS, em R\$

$D$  = Distância média percorrida, em km

$CV$  = coeficiente de custo variável, expresso em R\$/km. Considera pneus, combustível, lubrificantes, lavagem, manutenção e pedágio.

$$Frete = \left( \frac{C_{fijo} + C_{var}}{capac} \right) \quad (13)$$

Onde:

$Frete$  = Custo total de transporte, em R\$/t

$C_{fijo}$  = Custo fixo de transporte de RSS, em R\$

$C_{variável}$  = Custo variável de transporte de RSS, em R\$

$capac$  = Capacidade de carga líquida, em t

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

As distâncias entre as localidades que geram resíduos e as localidades potenciais para implantação da usina de lixo ou até as unidades de tratamento e disposição final atualmente disponíveis foram calculadas através da malha viária digital da Digimaps.

### *Receita do tratamento de RSS*

Considerou-se que as novas unidades de tratamento de RSS teriam receita compatível com o valor médio do mercado pela prestação do serviço de tratamento. Apesar de verificar grande variância nos valores coletados, o valor médio de tratamento do RSS foi de R\$ 1.500,00/t.

### *Custo de construção de uma nova unidade de tratamento de RSS*

O valor do investimento em uma unidade de tratamento de RSS com capacidade de 20 toneladas/dia foi estimado em R\$ 250/t/dia. Este valor de projeto foi calculado com base em estimativas de mercado para uma unidade com longevidade de 20 anos e taxa de oportunidade do capital de 10% a.a., e sem valor residual, utilizando a fórmula de cálculo de parcelas de pagamentos, estimou-se o valor de investimento diário na unidade de tratamento

### *Características sobre as unidades de tratamento RSS*

As cidades consideradas candidatas a receber novas unidades de tratamento de RSS foram restritas aos municípios no interior do estado de São Paulo com mais de 10.000 habitantes e na região indicada na Figura 3. O número de novas unidades e suas respectivas capacidades de tratamento de RSS foram definidos em função do cenário analisado.

### 3.3. *Cenários*

A partir do modelo matemático desenvolvido foram avaliados sete diferentes cenários de análise com a finalidade de identificação das localidades que apresentam maior potencial para implantação de novas unidades de tratamento de RSS.

Tal estratégia é proposta para verificar a recorrência das mesmas indicações de localidades sob condições diversas. Dessa forma, a análise de frequência de uma mesma solução em diferentes cenários é um indicativo da solidez das recomendações. Os cenários considerados variaram em função das escalas de tratamento de RSS (para analisar a estabilidade da resposta de localização em função do potencial crescimento das unidades de tratamento de RSS) e o número de unidades a serem implantadas (para avaliar a oportunidade de investimento em uma unidade de tratamento de RSS ou mais)

Os sete cenários avaliados foram:

- 1) Restrição das possibilidades de escolha para implantação da unidade de tratamento a uma localidade, com capacidade de processamento máximo de 20 t/dia cada unidade.
- 2) Restrição das possibilidades de escolha para implantação da unidade de tratamento a uma localidade, com capacidade de processamento máximo de 40 t/dia cada unidade.
- 3) Restrição das possibilidades de escolha para implantação da unidade de tratamento a uma localidade, com capacidade de processamento máximo de 60 t/dia cada unidade.
- 4) Restrição das possibilidades de escolha para implantação da unidade de tratamento a duas localidades, com capacidade de processamento máximo de 20 t/dia cada unidade.

- 5) Restrição das possibilidades de escolha para implantação da unidade de tratamento a três localidades, com capacidade de processamento máximo de 20 t/dia cada unidade.
- 6) Restrição das possibilidades de escolha para implantação da unidade de tratamento a cinco localidades, com capacidade de processamento máximo de 20 t/dia cada unidade.
- 7) Restrição das possibilidades de escolha para implantação da unidade de tratamento a dez localidades, com capacidade de processamento máximo de 20 t/dia cada unidade.

#### **4. Resultados e Discussões**

Os fluxos dos cenários 1 e 2 indicaram Jaú como localidade ideal para a implantação da unidade de tratamento. Especificamente em relação ao primeiro cenário (uma unidade com capacidade máxima de processamento de 20t/dia), as principais origens desses resíduos correspondem às cidades situadas na própria mesorregião de Jaú e nas mesorregiões vizinhas: Bauru, Marília e Araraquara com participação de 37%, 17% e 12% respectivamente. Observa-se grande pulverização das origens de resíduos processados pela usina, o que sugere que a oferta de resíduos sólidos na região seja próxima ao limite da capacidade instalada para tratamento e processamento de resíduos. Já no segundo cenário, os resultados apontam, como principais origens de RSS, as cidades da própria mesorregião e de mesorregiões vizinhas de maior porte: Piracicaba, Bauru e Ribeirão Preto, respectivamente com participação de 19%, 18% e 13%.

Com o aumento da capacidade de processamento da usina de lixo para 60 t/dia (cenário 3), a localização de cidade ideal recomendada altera-se para Campinas. As principais origens dos fluxos de resíduos correspondem às cidades da própria mesorregião

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

de Campinas e municípios localizados nas mesorregiões vizinhas: Campinas, Macro Metropolitana Paulista e Piracicaba, com participação de 32%, 14% e 13%, respectivamente.

Interessante notar que quando o cenário flexibiliza o número de unidades, ambas as cidades indicadas nos cenários anteriores voltam a ocorrer. Assim, no cenário 4, em que é permitida a instalação de 2 unidades com capacidade de processamento de 20 t/dia cada uma, o modelo escolhe novamente as cidades de Jaú e Campinas como localidades ideais.

As principais origens desses resíduos continuam sendo as cidades das mesorregiões onde se localizam as usinas e regiões próximas: Campinas, Bauru e Piracicaba com participação de 26%, 18% e 13% dos fluxos, respectivamente. A maior participação de cada mesorregião reflete-se no custo total logístico para suprimento de cada usina, tanto que os valores diários de custos logísticos são aproximadamente R\$ 1,47 mil e R\$ 3,30 mil para as usinas em Campinas e Jaú respectivamente. Chama a atenção o fato de que, apesar de Jaú possuir um maior custo logístico que Campinas, ele foi indicado no caso de implantação de uma única usina. A explicação para esse padrão de resposta é a de que o menor custo logístico é uma vantagem apenas sob a perspectiva do proprietário do novo empreendimento de tratamento de RSS, entretanto para o sistema do estado de São Paulo, a localização da usina em Campinas, nesse caso, é menos atrativa. Isso ocorre, porque Campinas localiza-se próxima da região de maior competição na oferta de unidades de tratamento de RSS, causando maior prejuízo logístico para a concorrência que a instalação da usina em Jaú.

O cenário 5, que permite a implantação de até três usinas, aponta São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Salto de Pirapora como municípios ideais para instalação das unidades. As principais origens desses resíduos seriam as mesorregiões de: Ribeirão Preto, Macro Metropolitana Paulista, São José do Rio Preto, com participação de 22%, 16% e 12% dos fluxos respectivamente.



## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

No cenário 6, que amplia a possibilidade de instalação para até cinco unidades de tratamento de RSS, juntam-se a São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Salto de Pirapora as cidades de Campinas e Cubatão como indicações. As principais origens desses resíduos seriam as seguintes regiões: Metropolitana de São Paulo (21% dos fluxos), Campinas (14%), Ribeirão Preto (13%), Macro Metropolitana Paulista (11%). Na seqüência temos a mesorregião de Piracicaba (8%) e a mesorregião de São José do Rio Preto, responsável por 7% dos fluxos.

Por fim, para o último cenário, que permite instalar até 10 unidades de tratamento de RSS, as cidades escolhidas pelo modelo, em ordem de importância, foram: São José do Rio Preto, Ribeirão Preto, Campinas, Salto, Campo Limpo Paulista, Salto de Pirapora, Várzea Paulista, São Roque, São Vicente e Cubatão.

Em suma, os resultados variam conforme o cenário analisado, mas, em geral, indicam soluções que podem ser divididas em dois grupos. Quando somente a capacidade de processamento varia, os municípios mais frequentemente apontados pelo modelo são Bauru, Piracicaba e Campinas. Por outro lado, quando permite-se implantar mais de uma unidade de tratamento, mantendo-se a capacidade de processamento constante, os municípios de São José do Rio Preto, Ribeirão Preto e Salto de Pirapora destacam-se como soluções ótimas. Isto se justifica pelo fato de que os municípios do oeste e noroeste de São Paulo representam geração relativamente inferior à região leste. Assim, unidades de tratamento menores, mas melhor localizadas e distribuídas no estado fazem mais sentido para suprir a demanda daquela região, proporcionando simultaneamente maximização do lucro do empreendedor e a minimização dos custos logísticos para tratamento dos RSS.

Em síntese, evidencia-se que, independentemente do cenário avaliado, existem oportunidades para instalação de novas unidades no interior do estado de São Paulo que contribuam para redução de custos logísticos da cadeia de tratamento de RSS.

## 5. Considerações Finais

Este trabalho buscou avaliar uma aplicação do modelo matemático de localização para identificar municípios-sede para novas unidades de tratamento de resíduos de serviços de saúde. Nota-se que o gerenciamento de RSS tem sido regulamentado através de leis federais, mas ainda há lacunas no cumprimento das etapas de tratamento e disposição final. Um dos fatores que contribui para esta situação é a insuficiente capacidade de tratamento de RSS instalada no país. Além disso, mesmo no estado de São Paulo, que possui uma situação mais favorável em termos de capacidade instalada, nota-se forte concentração das unidades próximas a grandes municípios geradores de RSS, como descrito neste artigo. Com isso, os RSS devem percorrer grandes distâncias para serem devidamente tratados em municípios que contam com unidades de tratamento.

Através de ampla pesquisa de diagnóstico da cadeia logística do RSS foi possível verificar as oportunidades em relação a novos empreendimentos de tratamento de RSS em regiões do interior do estado. De acordo com os resultados do modelo, as principais cidades indicadas para a implantação de novas unidades de tratamento de RSS são Jaú e Campinas, seguidas de São José do Rio Preto, Salto de Pirapora e Ribeirão Preto. A escolha das localidades indicadas está relacionada à distribuição espacial atual das unidades de tratamento e aos custos logísticos envolvidos em cada cenário.

Dentre as limitações do trabalho, destaca-se a elevada dependência de dados relativos a um segmento que possui pouquíssimas informações disponíveis. Neste sentido, um mesmo modelo tal como o desenvolvido no artigo pode indicar resultados distintos em função de parâmetros ou estimativas adotadas com magnitudes diferentes. Particularmente, dados de geração municipal de RSS ainda são desconhecidos. Assim, neste artigo, foi proposto um método para estimá-los, baseado tanto em coleta de dados primários, quanto de

estimativas a partir de regressão linear simples. Tal como este, uma série de outros dados de entrada também precisaram ser estimados, conforme mencionado no “Material e Métodos”.

Por outro lado, destaca-se o diferencial do modelo proposto, já que considera simultaneamente a maximização do lucro do ponto de vista do empreendedor, e a minimização no impacto de aumento dos custos logísticos de outras unidades concorrentes na região. Tal modelo pode ser útil para aplicação pela iniciativa privada ou pública, em diversos setores de atividades. No primeiro caso, pode ser utilizado para auxiliar a tomada de decisões envolvendo estratégias empresariais de ampliação que contemplem, por exemplo, novas plantas em diferentes localizações. No segundo, constitui-se numa ferramenta eficiente para planejamento público, já que contempla a minimização dos custos do sistema, o que, do ponto de vista social, seria extremamente favorável.

Este estudo corresponde a uma sugestão para adoção de modelo aplicado ao planejamento do setor de tratamento de RSS. Certamente, o modelo apresentado pode ser aprimorado e aplicado em outras iniciativas de investimentos em setores correlatos. Neste sentido, como sugestões para trabalhos futuros nesta mesma linha poderiam ser avaliadas localizações ótimas para tratamento de outros tipos de resíduos, tais como os resíduos sólidos urbanos - RSU, setor de atividade em busca de soluções adequadas e sustentáveis em todo o mundo. Novas sugestões de maximização de objetivos podem incluir, por exemplo, geração de eletricidade a partir dos resíduos tratados, redução de geração de externalidades negativas (tais como emissões de gases em geral), produção de biocombustível de segunda geração, dentre outras.

**Referências**

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (2010). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2009.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (2009). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2008.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (2006). Gerenciamento dos Resíduos de Serviço de Saúde. Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. – Brasília: Ministério da Saúde.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (2004). Resolução RDC nº 306, de 7 de dezembro de 2004. Dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde. DOU, 10 de dezembro de 2004.

BOWERSOX, D.J.; CLOSS, D.J. (2001). Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento. Tradução de A.F. Neves, P.F. Fleury e C. Lavallo (Coord.). São Paulo: Editora Atlas. 594 p.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2009). Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares 2008. Série Relatórios 183 p.

CHANG, N.; WANG, S. F. (1996). Solid Waste Management System Analysis by Multiobjective Mixed Integer Programming Model. *Journal of Environmental Management*. 48, 17-43.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2005). Resolução CONAMA nº 358, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde e dá outras providências. DOU, 4 de maio de 2005.

CUNHA, V. ; CAIXETA FILHO, J. V. (2002). Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas. *Gestão e Produção*, São Carlos, v. 9, n. 2, p. 143-161.

FRANCIS, R.L.; LOWE, T.J.; TAMIR, A. (2000) Aggregation error bounds for a class of location models. *Operations Research*, Cambridge, v. 48, n. 2, p. 294-307.

GANDELINI, L.;CAIXETA FILHO, J. V. (2007). Otimização dos aterros sanitários. *Revista de Economia contemporânea*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 509-523.

HAMAD, R. Modelo para localização de instalações em escala global envolvendo vários elos da cadeia logística (2006). 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2002). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Rio de Janeiro.

LI Y. P.; HUANG, G. H. (2006). An inexact two-stage mixed integer linear programming method for solid waste management in the City of Regina. *Journal of Environmental Management* 81, 188–209.

LIMA, M.P. (2003). Custeio do transporte rodoviário de Cargas. São Paulo: Atlas. 1 ed.

## PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

LOPES, R.L. (1997). Suinocultura no estado de Goiás: aplicação de um modelo de localização. Piracicaba, 1997. 95p. Dissertação (Mestrado em economia aplicada) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

REVELLE, C.S.; EISELT, H.A.(2005). Location analysis: a synthesis and survey. European Journal of Operational Research, Amsterdam, v. 165, n. 1, p.1–19.

SECRETARIA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (2009). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2007. Brasília: MCIDADES.SNSA, 262 p.