

Eixo Temático ET-01-047 - Gestão Ambiental

UTILIZAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA REVISÃO

Mariana Moreira de Oliveira, Gilson Barbosa Athayde Júnior

RESUMO

A fim de conhecer, bem como, entender a relação da geração dos resíduos com os fatores socioeconômicos, modelos matemáticos podem ser utilizados. Nesse sentido, o artigo tem por objetivo compilar estudos relativos à utilização de modelos matemáticos para estimar a geração de resíduos sólidos a fim de enfatizá-los como ferramenta viável na gestão dos resíduos sólidos. O presente trabalho trata-se de um levantamento bibliográfico que reúne diversos trabalhos disponíveis na literatura sobre o uso de modelos matemáticos para estimativa de resíduos sólidos. Várias pesquisas vêm estudando a relação dos fatores socioeconômicos com a produção de resíduos. O conhecimento dessa relação permite embasar a vertente de estudos presente na literatura voltada para o uso de modelos matemáticos que possam representar, a partir de fatores variados, a geração de RSU, em diferentes localidades. Percebe-se que, apesar de apresentar semelhanças entre as pesquisas, os fatores que influenciam na geração de RSU, bem como o quanto cada um deles exerce influência, variam de um estudo para outro. Conclui-se ainda que os modelos são capazes de projetar cenários futuros e estabelecer relações entre diferentes elementos, podendo no caso dos resíduos sólidos auxiliar na gestão dos mesmos.

Palavras-chave: Modelos matemáticos; Geração; Resíduos sólidos; Gestão.

INTRODUÇÃO

A crescente quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados vem causando diversos impactos ambientais e na saúde humana, a exemplo da poluição ambiental. Nesse sentido, torna-se importante a adoção de medidas que visem contornar essa situação, por meio da gestão desses resíduos. A gestão integrada de resíduos sólidos é definida como conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, levando em consideração os aspectos políticos, econômicos, ambientais, culturais e sociais, com controle social e respeitando a premissa do desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2010).

Uma importante etapa da gestão dos resíduos sólidos é a fase de diagnóstico. Esta consiste em realizar um levantamento da situação atual dos diferentes tipos de resíduos sólidos, compreendendo uma análise quantitativa e qualitativa dos resíduos gerados, coletados, transportados, reutilizados, recuperados, reciclados, tratados, beneficiados, ou que sejam destinados no território do município, bem como da disposição final dos resíduos e rejeitos (BRASIL, 2014).

Segundo Abdoli et al (2011) conhecer a quantidade de resíduos gerados é essencial para se ter o adequado planejamento do sistema de gestão de resíduos, podendo-se assim, adotar providências necessárias para o investimento em máquinas, capacidade de disposição, assim como determinar futuras áreas para aterro sanitário.

A quantificação dos resíduos sólidos de um município pode ser uma atividade difícil, representar um custo adicional na fase do diagnóstico, bem como protelar a gestão desses resíduos. Nesse contexto, o uso de modelos matemáticos para representar a geração de resíduos sólidos pode auxiliar no processo de gestão.

Diversos fatores socioeconômicos podem estar associados à geração dos RSU, tais como, densidade demográfica, economia local, hábitos e costumes da população, variações sazonais e climáticas, leis e regulamentações específicas, entre outros (OLIVEIRA et al., 2004).

A fim de conhecer, bem como, entender a relação da geração desses resíduos com os aspectos populacionais, o crescimento econômico e os padrões de vida, por exemplo, modelos matemáticos podem ser utilizados (LIU e WU, 2011). Segundo Gonçalves et al., (2016) a modelagem dá suporte a tomada de decisões e prioridades quanto à redução dos volumes aterrados, visando o prolongamento da longevidade dos aterros, bem como a considera como uma ferramenta útil na elaboração do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.

O artigo tem por objetivo compilar estudos relativos à utilização de modelos matemáticos para estimar a geração de resíduos sólidos a fim de enfatizá-los como ferramenta viável na gestão dos resíduos sólidos.

METODOLOGIA

O presente trabalho trata-se de um levantamento bibliográfico que reúne diversos trabalhos disponíveis na literatura sobre o uso de modelos matemáticos para estimativa de resíduos sólidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Várias pesquisas vêm estudando a relação dos fatores socioeconômicos com a produção de resíduos. O conhecimento dessa relação permite embasar a vertente de estudos presente na literatura voltada para o uso de modelos matemáticos que possam representar, a partir de fatores variados, a geração de RSU, em diferentes localidades. Através de modelos matemáticos pode-se analisar a influência de fatores socioeconômicos na produção de RSU, compreender seus efeitos, prever estimativas de geração e desenvolver planos de gestão (ABDOLI et al., 2011).

A Tabela 1 apresenta, além dos fatores relacionados à geração da massa de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)/Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) a nível de massa total ou per capita, a possível natureza da relação entre eles, a saber: direta ou indireta. A primeira, como próprio nome sugere, indica uma relação explícita, por exemplo, quanto maior a população de uma amostra, maior será a massa de resíduo. Já na segunda, a influência se dá pela representatividade do fator, por exemplo, o consumo de água revela a intensidade de uso da residência, não sendo ele diretamente responsável por gerar o resíduo de fato.

Tabela 7 - Fatores relacionados à geração de RSU/RSD

Fatores relacionados à geração de RS	RS _m	RS _{pc}	Fonte	Contexto	Possível natureza da relação
Consumo de água	X	-	Leite (2006) apud Onofre (2011)2	Domicílios urbanos	Indireta
	X	-	D'Ella (2000) apud Onofre (2011)2	Domicílios urbanos	Indireta
	X	-	Athayde Jr, Onofre e Beserra (2014)2	Casa e apartamentos	Indireta
Consumo de energia elétrica	X	-	Leite (2006) apud Onofre (2011)2	Domicílios urbanos	Indireta
Área construída	X		Leite (2006) apud Onofre (2011)2	Domicílios urbanos	Indireta

Renda	X	-	D'Ella (2000) apud Onofre (2011) ²	Municipal	Direta
	X	-	Afon e Okewole (2007) ²	Domicílios urbanos	Direta
	X	-	Daskalopoulos, Badr e Probert (1998) ¹	Nacional	Direta
	X	-	Afon e Okewole (2007) ¹	Nacional	Direta
	X	-	Melo, Sautter e Janissek (2009)	Municipal	Direta
	-	X	Benítez et al. (2008) ²	Domicílios urbanos	Direta
	-	X	Dias et al. (2012) ¹	Municipal	Direta
	-	X	Oliveira et al. (2004) ²	Domicílios urbanos	Direta
	-	X	Hoornweg e Bhada-Tata (2012) ¹	Nacional	Direta
	-	X	Dangi et al. (2008) ²	Domicílios urbanos	Direta
	-	X	Beigl et al. (2004) ¹	Municipal	Direta
	-	X	CETESB (2015)	Municipal	Direta
-	X	SNIS (2016) ¹	Municipal	Direta	
Tamanho da família	X		Afon e Okewole (2007) ²	Domicílios urbanos	Direta
	X		Pinto, Pereira e Freitas (2012) ²	Municipal	Direta
	X		Bandara et al. (2007) ²	Domicílios urbanos	Direta
Escolaridade	X	-	Afon e Okewole. (2007) ²	Domicílios urbanos	Indireta
	-	X	Benítez et al. (2008) ²	Domicílios urbanos	Indireta
Status social	X	-	Afon e Okewole (2007) ²	Domicílios urbanos	Indireta
Profissão	X	-	Afon e Okewole (2007) ²	Domicílios urbanos	Indireta
Época do ano	X	-	Afon e Okewole (2007) ²	Domicílios urbanos	Indireta
População	X		Daskalopoulos, Badr e Probert (1998) ¹	Nacional	Direta
	X		SNIS (2016) ¹	Municipal	Direta
	X		Silvia (2012) ¹	Municipal	Direta
	X		Abdoli et al. (2011) ¹	Nacional	Direta
	X		Athayde Jr, Onofre e Beserra (2014) ²	Casa e apartamentos	Direta
	X		Adhikari, Barrington e Martinez (2006)	Nacional	Direta
	X		Melo, Sautter e Janissek (2009)	Municipal	Direta
	-	X	Soares et al. (2015) ¹	Municipal	Direta
Índice de qualidade de vida urbana	X	-	Pinto, Pereira e Freitas (2012) ²	Municipal	Indireta
Número de pessoas empregadas em uma casa	X		Bandara et al. (2007) ²	Domicílios urbanos	Indireta
	X		Abdoli, Falahnezhad e Behboudian (2011) ¹	Nacional	Indireta
	-	X	Benítez et al. (2008) ²	Domicílios urbanos	Direta
Temperatura	X	-	Abdoli, Falahnezhad e Behboudian (2011) ¹	Nacional	Indireta
Idade	-	X	Silva, Barbieri e Monte-Mor (2012) ¹	Municipal	Indireta
	-	X	Beigl et al. (2004) ¹	Municipal	Indireta
Taxa de mortalidade	-	X	Beigl et al. (2004) ¹	Municipal	Indireta
Expectativa de vida ao nascer	-	X	Beigl et al. (2004) ¹	Municipal	Indireta
IDHM	-	X	Soares et al. (2015) ¹	Municipal	Indireta
Densidade populacional	-	X	Silva, Barbieri e Monte-Mor (2012) ¹	Municipal	Direta
	-	X	Beigl et al. (2004) ¹	Municipal	Direta

¹Fator relacionado aos RSU; ²Fator relacionado aos RSD; RS_m - Resíduo Sólido a nível de massa total, RS_{PC} - Resíduo Sólido a nível per capita

Fonte: Autora (2016)

Estudos Internacionais

A literatura estrangeira apresenta uma extensa faixa de estudos que fazem uso de modelos para estimar a quantidade de resíduos sólidos, tanto para conhecer os fatores interligados à sua geração, quanto para simular cenários futuros de gestão.

Hockett, Lober e Pilgrim (1995) realizaram um trabalho na Carolina do Norte, Estados Unidos, no qual estudaram a influência de variáveis econômicas, demográficas e estruturais na geração de RSU, em 100 condados do estado. As variáveis analisadas pelos autores foram: econômicas (vendas no varejo *per capita*, valor *per capita* adicionado por fabricação e custos de construção *per capita*); estrutural (custo por tonelada para eliminar os resíduos no aterro, que é chamado de taxa de uso); demográficas (renda *per capita* e percentual da população urbana). O modelo de regressão formulado é apresentado na Equação 1.

$$\text{RSU} = 3,725 - 0,034 \cdot \text{Tx} + 0,323 \cdot \text{VV} + 0,059 \cdot \text{VA} + 0,227 \cdot \text{C} - 0,000 \cdot \text{R} + 0,007 \cdot \text{POP}_u \quad r^2 = 0,497 \quad (1)$$

Onde:

RSU: Resíduo Sólido Urbano (lbs.hab⁻¹.dia⁻¹)

Tx: Taxa de uso (\$.ton⁻¹)

VV: Vendas no varejo (\$1000.hab⁻¹)

VA: Valor adicionado por fabricação (\$1000.hab⁻¹)

C: Custo de construção (\$1000.hab⁻¹)

R: Renda *per capita* (\$.hab⁻¹)

POP_u: Porcentagem da população urbana (%)

Já na Europa, o estudo realizado por Beigl et al. (2004), em algumas cidades do continente, objetivou identificar os parâmetros que ajudam a explicar a geração de RSU, bem como estimar as quantidades futuras desses resíduos. Os indicadores socioeconômicos analisados pelos autores foram: população, estrutura etária da população (0 a 14 anos / 15-59 anos / 60 e mais anos), densidade populacional, emprego (agricultura, indústria e serviços), taxa de mortalidade infantil, PIB, esperança de vida ao nascer, tamanho médio da família e taxa de desemprego. Foi realizado um agrupamento dos dados com padrões sociais e econômicos similares, através da Análise Cluster, em níveis de prosperidade (BEIGL et al., 2004), como pode ser visto na Tabela 2. Com base no agrupamento, os autores perceberam que menores taxas de geração de RSU estão associadas a valores inferiores do PIB *per capita*, maiores taxas de mortalidade infantil e predominância do trabalho agrícola.

Tabela 2 - Geração de RSU e indicadores desenvolvimento.

Indicadores de desenvolvimento Nacional e Geração de RSU	Nível de prosperidade			
	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
PIB <i>per capita</i>	5841	11400	19418	21317
Taxa de mortalidade Infantil	15,0	8,7	7,6	5,5
Setor agrícola	24,0	18,7	4,8	3,2
Setor de Serviços	44,4	52,2	59,4	66,2
RSU (kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹)	287	367	415	495

Fonte: Beigl et al. (2004, p.3).

Para formulação do modelo, os dados de geração passaram pelo procedimento regressão *backward*, resultando nos modelos apresentados nas equações de 2 a 4, respectivamente, para os níveis de prosperidade: muito alta, alta, e alta e média (BEIGL et al., 2004).

$$\boxed{RSU = 359,5 + 0,014*PIB - 197,1* \log (TM_{urb})} \quad r^2 = 0,510 \quad (2)$$

$$\boxed{RSU = 276,5 + 0,016*PIB - 126,5* \log (TM_{urb})} \quad r^2 = 0,520 \quad (3)$$

$$\boxed{RSU = - 360,7 - 375,6* \log (TM_{urb}) + 8,93*Pop_{15-59} - 123,9*TMF + 11,7*EVN} \quad r^2 = 0,600 \quad (4)$$

Onde:

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos (kg.hab⁻¹.ano⁻¹)

PIB: Produto Interno Bruto *per capita*

TM_{urb}: Taxa de mortalidade infantil por 1.000 habitantes nascidos do país

Pop₁₅₋₅₉: Porcentagem da população com idade entre 15 a 59 anos

TMF: Tamanho médio da família

EVN: Expectativa de vida ao nascer

Com o objetivo de analisar o efeito de diferentes cenários de gestão sobre a massa de resíduos de comida urbana a serem depositados em aterros em todo o mundo, até o ano de 2025, Adhikari, Barrington e Martinez (2006), previram a quantidade de RSU do país através da relação estabelecida entre PIB e porcentagem da população que vivem em áreas urbanas. A massa de RSU foi estimada pela equação 5.

$$\boxed{RSU = 3,65 \times 10^{-9} * (P_u) * (RSU_{pc}) * (P_t)} \quad r^2 = \text{não informado} \quad (5)$$

Onde:

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos (Gkg.ano⁻¹)

P_u: População urbana (%)

RSU_{pc}: Resíduos Sólidos Urbanos *per capita* (kg.hab⁻¹.dia⁻¹)

P_t: População total

A produção *per capita*, presente na equação 5, é calculada anteriormente pela equação 6 (ADHIKARI et al., 2006),:

$$\boxed{RSU_{pc} = 0,00006* PIB + 0,5656} \quad r^2 = \text{não informado} \quad (6)$$

Onde:

RSU_{pc}: Resíduos Sólidos Urbanos *per capita* (kg.hab⁻¹.dia⁻¹)

PIB: Produto Interno Bruto (US\$)

No estudo desenvolvido por Afon e Okewole (2007) na cidade de Oyo, Nigéria, buscou-se quantificar a geração de resíduos sólidos e identificar a relação destes com alguns fatores socioeconômicos. Os autores identificaram as seguintes variáveis: renda familiar, tamanho da família, escolaridade, status social, profissão e época do ano. O modelo obtido pelos autores (Equação 7) apresentou coeficiente de determinação significativo ao nível de 0,001. A massa de RSU é apresentada em kg.

$$\boxed{Y = - 0,325 + 0,485x_1 + 1,175x_2 + 1,540x_3 + 1,560x_4 + 1,265x_5 + 1,205x_6} \quad r^2 = 0,888 \quad (7)$$

Onde:

x₁: Renda familiar

x₂: Tamanho da família

x₃: Escolaridade

x₄: Status social

x₅: Profissão

x₆: Época do ano

Bandara et al. (2007) desenvolveram estudo em *Moratuwa*, área suburbana do *Sri Lanka*, a fim de determinar a taxa de geração e composição dos RSU, e relaciona-los com fatores socioeconômicos. As variáveis independentes analisadas foram: valor da propriedade, o número total de pessoas por habitação, número de famílias em uma casa, número total de membros empregados em uma casa, e o número de veículos automóveis pertencentes a um agregado familiar. Os autores realizaram uma análise de regressão em diferentes grupos baseado na renda, a saber: baixa renda (valor de avaliação de propriedades abaixo de 1.000 rúpias), baixa a média renda (valor de avaliação de propriedades entre 1.000 rúpias e 3.000 rúpias); média a alta renda (valor de avaliação de propriedades entre 3.000 rúpias e 6.000 rúpias); e alta renda (valor de avaliação de propriedades acima de 6.000 rúpias). Os autores concluíram que o aumento da quantidade de pessoas reduz a produção *per capita* de resíduos, e que quanto mais pessoas empregadas em uma casa maior é a geração de resíduos, possivelmente relacionado ao aumento do consumo nos níveis com maior renda. As tabelas 3 e 4 apresentam a regressão para a geração *per capita* de RO e total, respectivamente.

Tabela 3 - Análise de regressão de geração *per capita* de RO ($\text{kg.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$)

Variável	Coefficiente não padronizado B	Erro padrão	Coefficiente padronizado Beta	T	Sig.
Grupo de baixa renda					
Constante	0,597	0,082		7,236	0,000
Pessoas por domicilio	-4,672E-02	0,015	-0,377	-3,126	0,003
Grupo de baixa a média renda					
Constante	0,559	0,090		6,179	0,000
Pessoas por domicilio	-4,221E-02	0,017	-0,277	-2,476	0,016
Grupo de média a alta renda					
Constante	0,628	0,088		7,178	0,000
Pessoas por domicilio	-5,014E-02	0,016	-0,347	-3,047	0,003
Grupo de alta renda					
Constante	0,662	0,063		10,544	0,000
Pessoas por domicilio	-5,744E-02	0,013	-0,387	-4,518	0,000
Números de empregados	6,952E-04	0,000	0,183	2,135	0,035

Fonte: Bandara et al. (2007).

Tabela 4 - A análise de regressão de geração quantidade de RO (kg.dia^{-1})

Variável	Coefficiente não padronizado B	Erro padrão	Coefficiente padronizado Beta	T	Sig.
Grupo de baixa a média renda					
Constante	1,228	0,234		5,244	0,000
Números de empregados	0,244	0,116	0,238	2,107	0,039
Grupo de média a alta renda					
Constante	1,611	0,128		12,619	0,000
Números de empregados	8,091E-03	0,004	0,264	2,254	0,027
Grupo de alta renda					
Constante	1,087	0,271		4,016	0,000
Pessoas por domicilio	0,137	0,054	0,227	2,508	0,014

Fonte: Bandara et al. (2007).

Um estudo realizado por Benítez et al. (2008) em Mexicali, capital do Estado da Baixa Califórnia, noroeste do México, buscou estabelecer modelos matemáticos que se correlacionam com a geração *per capita* de RSD para as seguintes variáveis: educação, renda familiar e número de moradores por domicílio. A variável educação foi dividida nos seguintes níveis: primário, secundário, preparatório e profissional, sendo essa a ordem crescente do conhecimento adquirido, aos quais foram atribuídos valores de 1 a 4 para os

diferentes níveis (BENITEZ et al.,2008) . Os autores verificaram que a quantidade de RSD gerada foi maior nos níveis mais básicos de educação, assim como, nos domicílios onde há população no nível profissional. Outra variável analisada no estudo supracitado foi a densidade populacional. Segundo os dados obtidos no estudo, a taxa de geração de RSD é superior nas residências com 2 e 3 de habitantes, reduzindo com o aumento do número de residentes. A terceira variável estudada foi a renda familiar, na qual os domicílios que possuem renda entre 400 e 725 pesos mexicanos (faixa intermediária da renda), geram mais RSD. O trabalho apresentou 7 modelos distintos considerando duas, três ou quatro parcelas (BENITEZ et al., 2008). Aquele proposto pelos autores foi o modelo linear com três variáveis independentes: educação, número de habitantes e renda familiar (Equação 8).

$$Y_{RSWPC} = 1560,70 - 64,1X_{EDU} - 187,5X_{HAB} + 0,1X_{INC} \quad r^2 = 0,51 \quad (8)$$

Onde:

Y_{RSWPC} : Produção *per capita* de resíduos sólidos residenciais (RSW) por dia (Unidade: g.hab⁻¹.dia⁻¹)

X_{EDU} : Média de educação por família

X_{HAB} : Número de moradores por domicílio (densidade)

X_{INC} : Renda por família

Diante dos diversos métodos de abordagem no estudo dos resíduos sólidos, Beigl, Lebersorger e Salhofer (2008) realizaram uma revisão dos modelos de RSU publicados na literatura e constataram que diferentes técnicas de modelagem vêm sendo aplicada. Dos 45 modelos analisados, foram observados os seguintes métodos: regressão (simples e múltipla), comparações entre grupos, análise de correlação, análise input-output, análise de séries temporais e sistemas dinâmicos (BEIGL; LEBERSORGER; SALHOFER, 2008). Com base nos dados apresentados os autores observaram que aproximadamente 34% dos modelos utilizaram o método de regressão. O segundo método mais utilizado foi o de comparação de grupos, com valor aproximado de 30%. Na Tabela 5 é possível observar a variância explicada de alguns modelos, bem como o tamanho da amostra e quantidade de parâmetros identificados.

Tabela 5 - Modelos baseados em equações de regressão multivariada

Referência	Variável dependente (kg.hab ⁻¹ .ano ⁻¹ , se não indicado de outra forma)	Tamanho da amostra	Parâmetros identificados	Variância explicada (r ²)
Bach et al. (2003)	Resíduos	1071	14	0,50
	Resíduos de vidro	507	7	0,53
	Embalagens leves – coletados em pontos de entrega voluntária	71	3	0,400
	Embalagens leves – coleta seletiva	216	7	0,388
	Resíduos de metais	156	7	0,538
Bach et al. (2004)	Resíduos de papel	649	8	0,487
Beigl et al. (2004)	RSU	550 ^a	6	0,65
Grossman et al. (1974)	RSU (galões.semana ⁻¹)	103	3	0,36
Hockett et al. (1995)	RSU	100	2	0,497
Jenkins (1993)	Resíduos ^b (Libras.hab ⁻¹ .mês ⁻¹)	600 ^c	27 ^d	0,921
	Resíduos ^b (Libras.hab ⁻¹ .ano ⁻¹)	49 ^c	27 ^d	0,998
Salhofer e Graggaber (1999)	RSU	118	4	s.c

s.c – sem comentário; ^a Série temporal – 55 cidades; ^b Inclui resíduos do sector residencial e comercial; ^c Séries temporais a partir de 9 comunidades; ^d 13 regressores e 14 variáveis binárias regionais. Fonte: Beigl et al. (2008, p. 208).

Diferentemente dos trabalhos apresentados até o momento, um estudo realizado por Abdoli, Falahnezhad e Behboudian (2011) em *Mashhad*, no Irã, buscou identificar tanto a influência de fatores socioeconômicos quanto a relação de fatores climáticos na geração de RSU. Segundo os autores, o consumo de frutas pesadas e volumosas na cidade, a exemplo de melancia e melão, bem como de alguns legumes são superiores em estações quentes, devido a grande disponibilidade e baixo custo dos mesmos. Assim, afirmam os autores, a quantidade de RO aumenta nesse período. Um modelo de regressão multivariada foi desenvolvido para prever a estimativa de RSU. As variáveis analisadas no estudo foram classificadas em três grupos: social (população, número de empregados e tamanho da família), econômico (renda familiar e PIB) e fatores climáticos (precipitação e temperatura). Realizada a regressão, o modelo obtido pelos autores apresentou quatro variáveis independentes e foi capaz de explicar 70% da variância de RSU produzido. A Tabela 6 mostra os resultados do modelo.

Tabela 6 - Modelo logaritmo para estimativa de RSU (tonelada)

Variável	Coefficientes	Erro padrão	Estatística – t	Probabilidade
Log (nível de emprego)	0,160826	0,065823	2,443300	0,0161
Log (temperatura máxima)	0,103640	0,020814	4,979443	0,0000
Log (renda familiar)	0,482124	0,105928	4,551447	0,0000
Log (população)	0,552556	0,098560	5,606296	0,0000
Estatística de Durbin-Watson	1,931311	r ²	0,705994	
Soma dos quadrados residuais	0,758497	r ² ajustado	0,690190	
Erro padrão da regressão	0,082294	Critério de Akaike		- 2,107529
Critério de Schwarz	- 1,966647			

Fonte: Abdoli, Falahnezhad e Behboudian (2011, p.631).

Na Tailândia, Intharathirat et al. (2015), estudaram a previsão dos resíduos residenciais e comerciais para um longo período, até 2030, utilizando o método de *Grey model*. Foram analisados cinco fatores representativos dos dois grupos: despesas de consumo das famílias e tamanho da família, do setor residencial, e proporção de emprego, população, densidade populacional e urbanização, do setor comercial. De todos os modelos formulados, os resultados mostraram que GMC (1, 5) é o mais preciso com o menor erro de 1,16%. Através dessa abordagem matemática os autores observaram que a densidade populacional é o fator mais importante que afeta os resíduos coletados, seguido pela urbanização, proporção de emprego e tamanho da família, respectivamente. Observaram também que os fatores representativos do setor comercial podem afetar mais do que o do setor residencial.

Estudos Nacionais

No Brasil também têm se desenvolvido pesquisas nessa temática.

Um trabalho realizado na cidade de Curitiba (PR), Brasil, objetivou estudar diferentes cenários para o gerenciamento de RSU na cidade (MELO; SAUTTER; JANISSEK, 2009). Os autores utilizaram dados históricos de RSU e correlacionaram, respectivamente com a população e PIB total da cidade, através de regressão múltipla linear. A estimativa do RSU futuro, foi obtida através da equação 9.

$$\text{RSU} = 1,5657 * \text{PIB} - 3,6861 * \text{POP} + 5,5416 \quad r^2 = 0,84 \quad (9)$$

Onde:

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos (t/ano)

PIB: Produto Interno Bruto (R\$/ ano)

POP: População urbana (habitante)

Dias et al. (2012) apresentaram um modelo matemático para estimar a geração de resíduos sólidos residenciais urbanos no município de Belo Horizonte, Minas Gerais. O modelo foi desenvolvido a partir do cruzamento de microdados de pesquisas socioeconômicas conjunturais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e dados de coleta de RSU de microrregiões específicas município. Constituiu objeto do estudo apenas os resíduos gerados por edificações residenciais, comerciais, públicas e de prestação de serviços. Depois de realizadas as regressões entre as variáveis renda *per capita* deflacionada, geração domiciliar *per capita* e geração domiciliar total, foi estabelecido que a produção domiciliar de resíduos sólidos em Belo Horizonte pode ser representada pela Equação 10.

$$Y = -0,00000005 x^2 + 0,0006 x + 0,2848 \quad r^2 = 0,8525 \quad (10)$$

Onde:

Y: Produção *per capita* diária de resíduo sólido (kg.hab⁻¹.dia⁻¹);

x : Renda *per capita* mensal (R\$.hab⁻¹.mês⁻¹).

Outro trabalho em Belo Horizonte, foi realizado por Pinto, Pereira e Freitas (2012), que teve por objetivo identificar os fatores socioeconômicos e demográficos associados a geração de resíduos sólidos. O estudo analisou a influência dos seguintes fatores: características dos responsáveis pelos domicílios (sexo, raça/cor, idade, anos de estudo, renda), quantidade de moradores do domicílio e tipo de esgotamento sanitário. Outro fator analisado pelos autores foi o do IQVU (Índice de Qualidade de Vida Urbana) de 2000, que quantifica a oferta de equipamentos, bens e serviços dentro da cidade. Os autores adotaram o método dos Modelos Lineares de Regressão Múltipla, no qual resultou em nove modelos. No entanto, os autores observaram que as variáveis domiciliares, incluídas a partir do modelo 3 (Tabela 7), não foram significativas. Assim, concluíram que este é o mais apropriado e que o IQVU e o número de moradores são as variáveis que mais impactam a geração de RS no município. Destacando a importância do IQVU, que segundo os autores, nenhum estudo tinha comprovado essa relação.

Tabela 7 - Modelos de Regressão para a Geração de Resíduos Sólidos (tonelada) na AP

Modelo 3-Resíduos Sólidos = IQVU+ Morador			R ² =0,67
	Coefficiente	Erro – padrão	Sig t
(Constant)	-12598,51	2208,66	0,000
Índice IQVU	29204,48	4119,00	0,000
Número de Moradores por AP	0,17	0,02	0,000

AP: Área de Ponderação

Fonte: Pinto, Pereira e Freitas (2012, p.38).

Outro trabalho na mesma temática foi realizado por Athayde Jr, Onofre e Beserra (2014). Os autores objetivaram elaborar um modelo matemático para estimativa da quantidade gerada de RSD, em edifícios residenciais multifamiliar e residenciais unifamiliares, ambos de nível socioeconômico médio a alto, no qual foi avaliada a influência do consumo de água e energia elétrica como variáveis de relação indireta, indicadoras da intensidade de utilização do domicílio. Para formulação do modelo de estimativa de RSD, do estudo citado acima, foi empregado o método de regressão múltipla com nível de significância de 1%. Os autores obtiveram dois modelos distintos, um para apartamentos e outro para residências. Os modelos propostos pelos autores dividiram-se para aplicação em apartamentos e em residências, como podem ser vistos nas equações 11 e 12, respectivamente.

$$\boxed{MRSW_A = 0,204POP + 1,62WC - 6,527} \quad r^2 = 0,935 \quad (11)$$

$$\boxed{MRSW_H = 0,558POP + 1,19WC + 0,367} \quad r^2 = 0,666 \quad (12)$$

Onde:

$MRSW_A$: massa de RSD gerada em apartamentos residenciais ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$)

$MRSW_H$: massa de RSD gerada em residências unifamiliares ($\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$)

POP: população residente (habitante)

WC: consumo de água ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)

Soares et al. (2015) buscaram formular modelos para geração *per capita* de RSU em municípios situados na mesorregião do sertão do estado da Paraíba com menos de 10.000 habitantes. O trabalho considerou duas possibilidades para o cálculo da taxa de geração de RSU: uma em relação à população urbana do município (TX1), em $\text{kg} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$; e outra relativa à população total do município (TX2), na mesma unidade. Para modelagem da taxa de geração *per capita* os autores estudaram as seguintes variáveis independentes: PIB *per capita*, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), população total e urbana do município. Os dados foram submetidos a uma análise de regressão múltipla, na qual foi possível formular um modelo para a taxa 2 (SOARES et al., 2015). O modelo apresentado pelos autores (Equação 13) apresentou a população urbana, o PIB *per capita* e o IDHM como variáveis independentes. Para estimar a taxa de geração total no município, basta multiplicar a TX2 pela população total do mesmo.

$$\boxed{TX_2 = 0,00484PU + 0,1208PIB + 2,716IDHM - 1,983} \quad r^2 = 0,996 \quad (13)$$

Onde:

TX₂: taxa de geração *per capita* de RSU em função da população total do município ($\text{kg} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$)

PU: população urbana do município (mil habitantes)

PIB: produto interno bruto *per capita* do município (mil R\$)

IDHM: índice de desenvolvimento humano municipal

CONCLUSÕES

De acordo com os trabalhos presentes na literatura pôde-se perceber que, apesar de apresentar semelhanças entre as pesquisas, os fatores que influenciam na geração de RSU, bem como o quanto cada um deles exerce influência, variam de um estudo para outro. Tal fato pode ser explicado devido ao estudo de diferentes variáveis, e também por se tratar de localidades distintas, que por sua vez possuem características próprias.

Conclui-se ainda que os modelos são capazes de projetar cenários futuros e estabelecer relações entre diferentes elementos, podendo no caso dos resíduos sólidos auxiliar na gestão dos mesmos.

REFERÊNCIAS

ABDOLI, M. A.; FALAHNEZHAD, M.; BEHBOUDIAN, S. Multivariate Econometric Approach for Solid Waste Generation Modeling: Impact of Climate Factors. **Environmental Engineering Science**, v. 28, n. 9, p. 627-633, 2011.

ADHIKARI, K. B.; BARRINGT, S.; MARTINEZ, J. Predicted growth of world food waste and methane production. **Waste Manag Res**, v. 24, n. 5, p. 421-433, 2006.

AFON, A. O.; OKEWOLE, A. Estimating the quantity of solid waste generation in Oyo, Nigeria. **Waste Manag Res**, v. 25, p. 371-379, 2007.

ATHAYDE JR, G. B; ONOFRE, F. L; BESERRA, L. B. D. S. Tax calculation proposal for waste collection based on the amount of residential solid waste. **Acta Scientiarum**, v. 36, n. 1, p. 15-21, 2014.

BANDARA, N. J. G. J.; HETTIARATCHI, J. P.; WIRASINGHE, S. C.; PILAPIIYA S. Relation of waste generation and composition to socio-economic factors: a case study. **Environ Monit Assess**, v. 135, n. 1, p. 31-39, 2007.

BEIGL, P.; WASSERMANN, G.; SCHNEIDER, F.; SALHOFER, S. Forecasting municipal solid waste generation in major european cities. In: COMPLEXITY AND INTEGRATED RESOURCES MANAGEMENT, Osnabrueck, Germany, 2004. Disponível em: <<http://www.iemss.org/iemss2004/pdf/regional/beigfore.pdf>>. Acesso em: 25/02/2016.

BEIGL, P.; LEBERSORGER, S.; SALHOFER, S. Modelling municipal solid waste generation: A review. **Waste Management**, v. 28, p. 200-214, 2008.

BENÍTEZ, S. O.; LOZANO-OLVERA, G.; MORELOS, R. A.; VEJA, C. A. Mathematical modeling to predict residential solid waste generation. **Waste Management**, v. 28, p. S7-S13, jun., 2008.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010.

CESTB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos**. São Paulo: CESTESB, 2015.

DANGI, M. B.; URYNOWICZ, M. A.; GEROW, K. G.; THAPA, R. B. Use of stratified cluster sampling for efficient estimation of solid waste generation at household level. **Waste Manag Res**, v. 26, p. 493-499, 2008. Disponível em: <<http://wmr.sagepub.com/content/26/6/493>>. Acesso em: 14 set. 2015.

DASKALOPOULOS, E.; BADR, O.; PROBERT, S. D. Municipal solid waste: a prediction methodology for the generation rate and composition in the European Union countries and the United States of America. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 24, p. 155-166, 1998.

DIAS, D. M.; MARTINEZ, C. B.; BARROS, R. T. V.; LIBANIO, M. Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais. **Eng. Sanit. Ambient**, v. 17, p. 325-332, 2012.

GONCALVES, A. T. T.; FIGUEIREDO, A. P. S.; MEYSTRE, J. DE A.; LIMA, R. DA S.; MARQUES, G. L. Estimativa de geração de resíduos sólidos urbanos para municípios consorciados. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36, 2016, João Pessoa, Anais...João Pessoa: ABEPRO, 2016. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_226_316_29763.pdf>. Acesso em: 25/11/2016.

HOCKETT, D.; LOBER, D.; PILGRIM, K. Determinants of *Per capita* Municipal Solid Waste Generation in the Southeastern U.S. **Journal of Environmental Management**, v. 45, p. 205-217, 1995.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. **What a waste: a global review of solid waste management**. Urban development series, knowledge papers, n. 15. World Bank, Washington, DC. World Bank. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>>. Acesso em: 20 jun. 2015.

INTHARATHIRAT, R.; SALAM, P. A.; KUMAR, S.; UNTONG, A. Forecasting of municipal solid waste quantity in a developing country using multivariate grey models. **Waste Management**, v. 39, p. 3-14, 2015.

LIU, C.; WU, X. Factors influencing municipal solid waste generation in China: A multiple statistical analysis study. **Waste Manag Res**, v. 29, n. 4, p. 371-378, 2011.

MELO, C. R. A.; MIRANDA, E. C.; MENDONÇA, J. C. Uma análise sobre a demanda pelos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil para o período de 1995 a 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife, Anais...Recife: ABES, 2009.

OLIVEIRA, S. A.; LEITE, V. D.; PRASAD, S.; RIBEIRO, M. D. Estudo da produção *per capita* de resíduos sólidos domiciliares da cidade de Campina Grande-PB. **Revista Saúde e Ambiente**, v. 5, n. 2, p. 37-44, 2004.

ONOFRE, F. L. **Estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

PINTO, M. R.; PEREIRA, D. R. M.; FREITAS, R. C. Fatores sociais, econômicos e demográficos associados à geração de lixo domiciliar na cidade de Belo Horizonte. **Reuna**, v. 17, n. 2, p. 27-44, 2012.

SILVA, H.; BARBIERI, A. F.; MONTE-MOR, R. L. Demografia do consumo urbano: um estudo sobre a geração de resíduos sólidos domiciliares no município de Belo Horizonte. **Rev. Bras. Estud. Popul.**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 421-449, 2012.

SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2014**. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA)/Ministério das Cidades, 2016.

SOARES, L. V.; ATHAYDE JR, G. B.; DANTAS, A. M. X.; MORAIS, A. C.; CORDEIRO, A. A. Taxa de geração *per capita* de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte da mesorregião do sertão paraibano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITARIA E AMBIENTAL, 28, 2015, Rio de Janeiro, Anais...Rio de Janeiro: ABES, 2015.