

MODELAGEM ESTATÍSTICA DO QUANTITATIVO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DESTINADOS À CENTRAL DE TRATAMENTO MARCA AMBIENTAL

STATISTICAL MODELING OF THE QUANTITATIVE SOLID WASTE AIMED TO CENTER OF THE ENVIRONMENTAL TREATMENT BRAND

KAJSA KISSELY SANTÓRIO*

TATIANA FERREIRA IZATO*

LUCIA HELENA SAGRILLO PIMASSONI**

ISSUE DOI: 10.5008/1809.7367.048

RESUMO

Neste estudo, apresenta-se a análise do quantitativo de resíduos sólidos urbanos (RSUs) destinados ao aterro sanitário da Central de Tratamento Marca Ambiental, obtidos no período 1995 a 2010. O trabalho tem o objetivo de promover a análise de previsão por metodologia estatística dos dados fornecidos pela CTR Marca, gerando um modelo para descrever o comportamento do quantitativo de resíduo. O modelo utilizado para se ajustar à série de dados foi o ARIMA, que é um modelo de série temporal o qual auxiliou nas projeções estatísticas referentes aos quantitativos de RSU para o ano de 2020. No entanto, além do ARIMA, foi utilizada a regressão linear simples para projeções até o ano 2025. Tendo as projeções estabelecidas, calculou-se o equivalente em células do aterro sanitário necessárias para suprir a demanda da população atendida pela empresa para o ano de 2020, que seria o equivalente a 9,5 células de 460.000 m³, dados fornecidos pelo modelo ARIMA. Já pelo método de regressão, foram obtidas 8,5 unidades de células para o ano em referência.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Aterro sanitário. Séries temporais. Regressão. Projeções.

ABSTRACT

In this study, it is presented a quantitative analysis of municipal solid waste destined for landfill treatment center Marca Ambiental, and these data were from 1995 to 2010. The work aims to promote statistical analysis of these data provided by CTR Marca, so it can generate a model that demonstrates the quantitative behavior for the company. The model used to fit the data series was ARIMA, which is a kind of time series model, and this aided the statistics for quantitative projections of RSU for the year 2020. However, in addition to the ARIMA regression was used for simple linear projections until the year 2025 to compare the projections in different methods. Having established the projections used to calculate the equivalent cells in the landfill needed to meet the demand of the population served by the company for the year 2020, which would be equivalent to 9.5 cells of 460,000 m³, data provided by ARIMA model, and the regression method was obtained 8.5 cell units for the reference year.

Keywords: Waste. Landfill. Times series. Regression. Projections.

* Engenharia Ambiental (Unicape/Faesa).

** Mestre em Engenharia Ambiental (Aev/Faesa).

INTRODUÇÃO

A preocupação em relação ao “lixo” iniciou-se no século XIX, período no qual havia grandes ameaças causadas pelas epidemias, conferindo novo significado ao resíduo sólido, o qual gerou diversos transtornos ao ser humano devido à proliferação de vetores que causam doenças e infecções. Assim, diante dessa conjuntura, as autoridades, em conjunto com a sociedade, começaram a criar normas para organizar espaços nas cidades como locais de despejo dos restos, culminando na tendência de tornar o lixo um objeto quantificável.

No século XXI, estudos sobre resíduos sólidos urbanos revelaram a preocupação em quantificá-los e eles tiveram a possibilidade de se tornar um termômetro da produção e do consumo de localidades. Tais estudos permitiram o conhecimento de indicadores de geração de resíduos e suas projeções, que são de fundamental importância para auxiliar como critério técnico em gerenciamento.

Portanto, o presente trabalho procurou descrever o crescimento da geração de resíduos com o decorrer dos anos, bem como avaliar a necessidade de áreas que deverão atender à demanda de resíduos no futuro, conhecidas por meio das projeções estatísticas. Vale salientar que essas conjecturas podem ajudar também no planejamento de gestão eficiente no Estado do Espírito Santo. Nesse contexto, este estudo está fundamentado na realização de análises estatísticas de quantitativos de resíduos sólidos urbanos, com o objetivo de proporcionar um gerenciamento eficiente na CTR Marca e, por conseguinte, aos municípios que são atendidos por ela.

MATERIAIS E MÉTODOS

Base de dados dos quantitativos de resíduos sólidos urbanos

Este estudo tem como base de dados os quantitativos de resíduos sólidos urbanos (RSUs), em toneladas, que foram destinados à empresa Marca Ambiental mensalmente, no período de 1995 a 2010.

Ressalta-se que tais dados compreendem a disposição de resíduos dos municípios de Vitória, Cariacica, Serra e Viana e também dos municípios turísticos do Estado como Domingos Martins, Marechal Floriano e Santa Leopoldina, com o recebimento de resíduos (MARCA AMBIENTAL, 2011).

Análise de dados

Para analisar a série do quantitativo de resíduos sólidos urbanos recebidos pela CTR Marca, foram utilizadas metodologias estatísticas como: métodos descritivos, para resumo e organização dos dados, e inferenciais, para estimação e verificação de hipóteses. Toda inferência estatística foi realizada a um nível de 5% de significância.

Dentre os testes de hipóteses empregados no presente trabalho, está a análise de variância (Anova), que foi aplicada para verificar a existência de diferença significativa entre os meses e também entre os anos em relação ao quantitativo de resíduos sólidos urbanos recebidos pela Marca Ambiental. Para realizar a análise de variância, três pressupostos foram considerados: as populações das quais foram retiradas as amostras são normalmente distribuídas ou aproximadamente normais, as variâncias populacionais são iguais ou aproximadamente iguais e a independência entre as observações (MORIGAKI, 2003).

Foram utilizadas as técnicas de regressão linear simples e série temporal para realizar previsões dos resíduos sólidos coletados.

A análise de regressão linear simples visa a modelar e investigar relações entre duas ou mais variáveis, que, neste caso, foi o tempo e a quantidade de resíduos. Pontua-se que, para que a modelagem seja válida, os erros do modelo devem ser não correlacionados, ter variância constante, distribuição normal e média zero. A regressão linear simples procura caracterizar a relação entre duas variáveis por meio da equação da reta que melhor explica os dados observados. A equação $y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$ é denominada modelo de regressão linear simples, o qual usualmente X (na pesquisa, tempo) é denominado variável independente, explicativa ou regressora e Y (na pesquisa, quantidade de resíduos sólidos) é denominado variável dependente ou variável resposta, β_0 é uma constante, β_1 é chamado de coeficiente de regressão e ε é o erro.

A série temporal, que é um conjunto de observações dos valores que uma variável assume em momentos do tempo, tem como objetivo a construção de modelos matemáticos para realizar previsões futuras. Neste estudo, o modelo de série temporal utilizado foi o ARIMA, que é um modelo não estacionário, dito ser autorregressivo integrado média móvel, uma vez que a diferenciação $(1 - B)^d \{X_t\}$ (d inteiro e maior igual a 1) resultou em um processo ARMA (p, q).

Sabendo-se que, no estudo de séries temporais, podem existir vários modelos que descrevem de forma satisfatória o comportamento dos dados, foram utilizados critérios de seleção de modelos para obter o que se ajusta de forma mais adequada aos dados. De acordo com Wei (1991), os critérios AIC e SBC fornecem informações confiáveis para a escolha do modelo. Na maioria dos modelos estimados, esses critérios apresentaram valores próximos. Assim, foi utilizado o critério do EQM para a escolha do melhor ajuste.

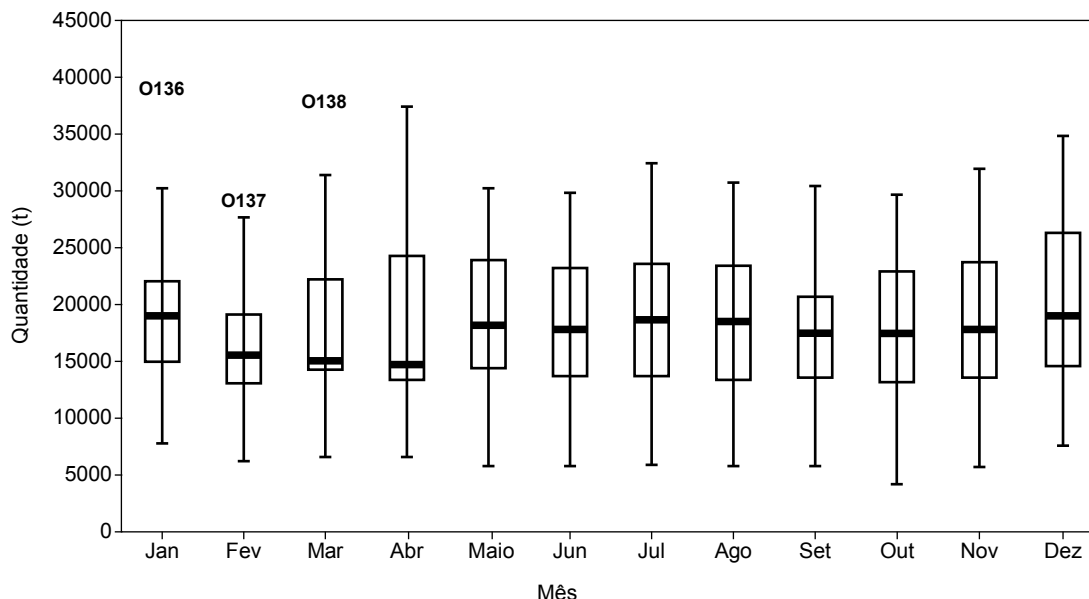
A análise estatística foi executada utilizando o Pacote Estatístico SPSS, versão para estudantes, e o software *Minitab* versão livre para elaboração de gráficos das séries temporais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados os resultados obtidos do estudo da estatística descritiva e inferencial realizado, com o principal objetivo de fazer projeções do quantitativo de resíduos sólidos recebidos na CTR Marca.

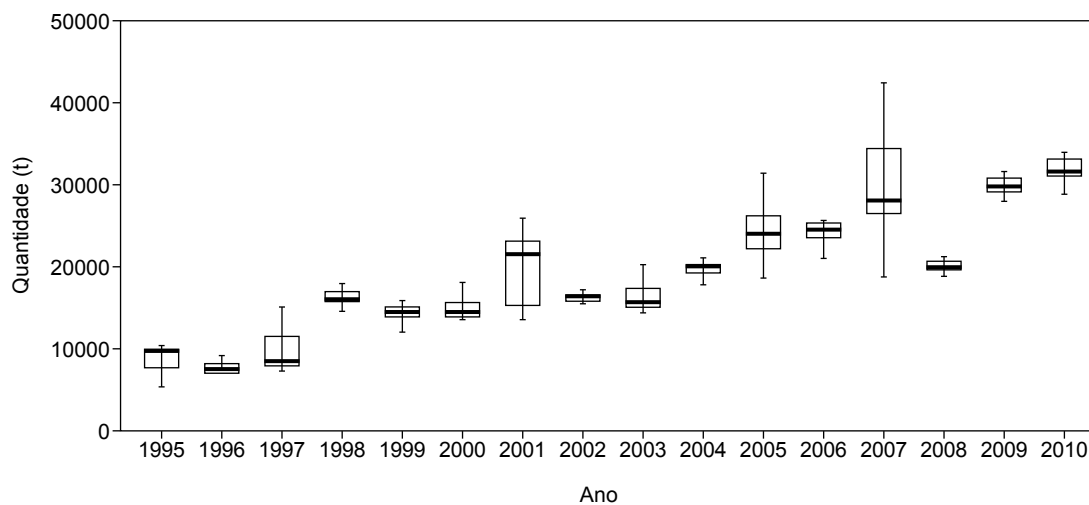
Na análise de relação entre quantitativos de resíduos recebidos na CTR Marca com o mês, pôde-se observar que o coeficiente de variação se mostra aproximadamente constante ou homogêneo (em torno de 40%) demonstrando que a variabilidade está similar entre os meses para o período estudado. Essa variabilidade é considerada regular, conforme o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Relação quantitativo (t) versus meses



Na relação do quantitativo de resíduos, de acordo com o ano, observa-se que há diferença significativa (valor-p < 0,05) na média de resíduos sólidos urbanos com o decorrer dos anos, ratificando uma tendência crescente da geração de resíduos (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Relação quantitativo de resíduos (t) versus anos



Com o objetivo de fazer comparação entre os meses, foi utilizado o teste de hipótese Anova (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise de Variância (Anova) para comparação entre os meses

Varição	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média quadrática	F	Valor-p.
Entre (Tratamentos)	167623335,589	11	15238485,054		
Dentro (Erros)	10150382591,767	171	59358962,525	0,257	0,992
Total	10318005927,356	182			

Dessa forma, verifica-se, ao nível de 5%, que não existe diferença estatisticamente significativa entre os meses (valor-p = 0,992). Para comparação entre os anos, foi necessária a substituição do teste paramétrico Anova pelo teste não paramétrico de Kruskal – Wallis, visto que o ano de 1995 possui um número de observações não representativo, com apenas três dados registrados. Diante disso, não seria possível garantir o pressuposto da normalidade necessário para realizar o teste Anova. O resultado do teste de Kruskal – Wallis indicou, ao nível de 5%, que existe diferença estatisticamente significativa (valor-p = 0,000) entre os anos (Tabela 2).

Tabela 2 – Comparação entre anos – Kruskal – Wallis

Quantidade (t)	
Estatística de teste (qui-quadrado)	160,932
Grau de liberdade	15
Valor-p	0,000

Modelagem para estimar os quantitativos de RSU com o decorrer dos anos pela regressão linear simples

Neste estudo, foi aplicada a metodologia de análise de regressão linear simples para realizar a estimação de quantitativos, pontuando que a análise foi feita com os somatórios de cada ano. A dispersão dos quantitativos, com o passar dos anos, indica que existe uma relação linear positiva entre o quantitativo de resíduo e o tempo, ou seja, o quantitativo de resíduo aumenta com o tempo. Por meio do método de mínimos quadrados, o polinômio de regressão é dado pela Equação 1:

$$\hat{y} = -40988334,25 + 20570,45x$$

O coeficiente de correlação de Pearson foi igual a 0,919, e o resultado do teste de hipótese para o coeficiente de correlação teve o valor – p = 0,000, ou seja, conclui-se que existe uma relação significativa, ao nível de 5%, entre as variáveis. O coeficiente de determinação da equação ajustada foi de 84,5%, indicando que a equação explica aproximadamente 85% da variação do quantitativo de resíduo, sendo este um ajuste considerado adequado. Os resultados da tabela Anova e do teste t-Student, conforme Tabelas 3 e 4, indicaram a significância da regressão, bem como a não nulidade dos coeficientes da equação (valor-p < 0,05). Foi realizada a análise de resíduos para verificar se não ocorreu violação dos pressupostos para o modelo de regressão.

Tabela 3 – Tabela Anova para regressão

Variação	Soma de quadrados	Grau de liberdade	Média quadrática	F	Valor-p
Regressão	143868760488,9	1	143868760488,9	76,156	0,000
Resíduo	26447764060,9	14	1889126004,35		
Total	170316524549,8	15			

Tabela 4 – Teste de t-Student para os coeficientes da regressão

	Coefficientes	Estatística de teste t-Student	Valor-p
Constante	-40988334,25	-8,684	0,000
Ano	20570,45	8,727	0,000

O pressuposto de normalidade foi verificado pelo do histograma (Gráfico 3) e o gráfico de probabilidade normal (Gráfico 4). Tanto o histograma quanto o gráfico de probabilidade normal indicam que os resíduos apresentam uma distribuição aproximadamente normal. A condição de normalidade foi confirmada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (valor-p = 0,875).

Gráfico 3 – Histograma de resíduos da regressão

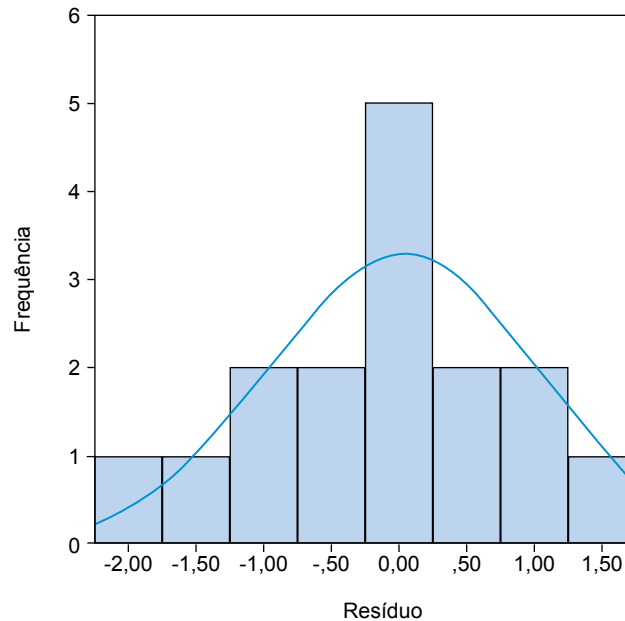
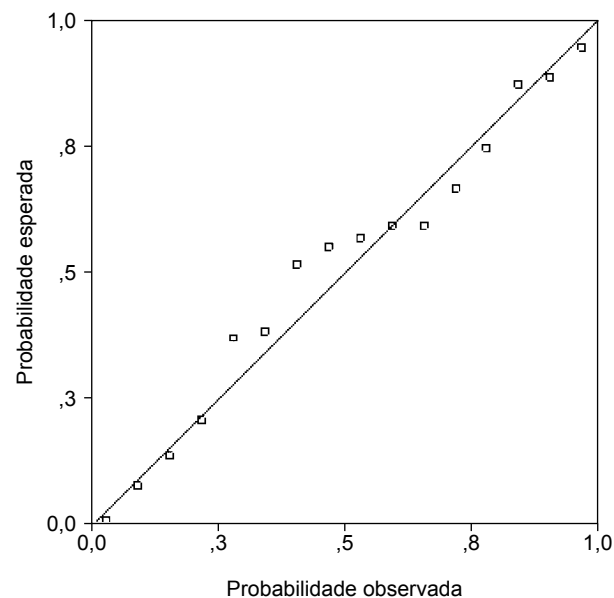
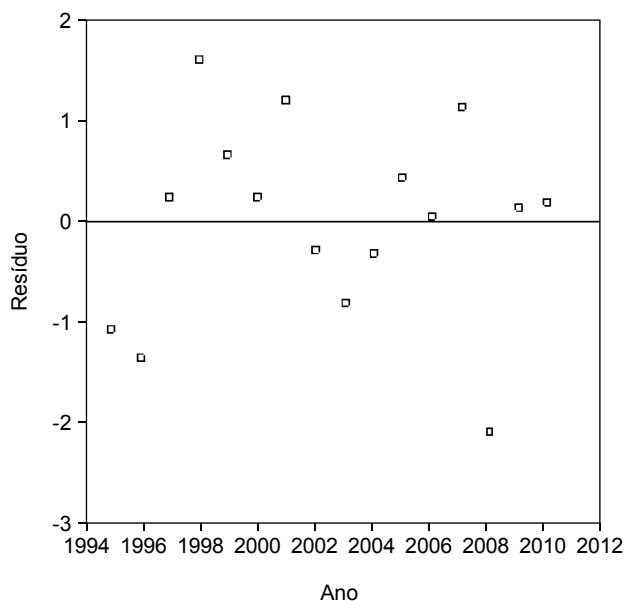


Gráfico 4 – Probabilidade normal (P-Plot)



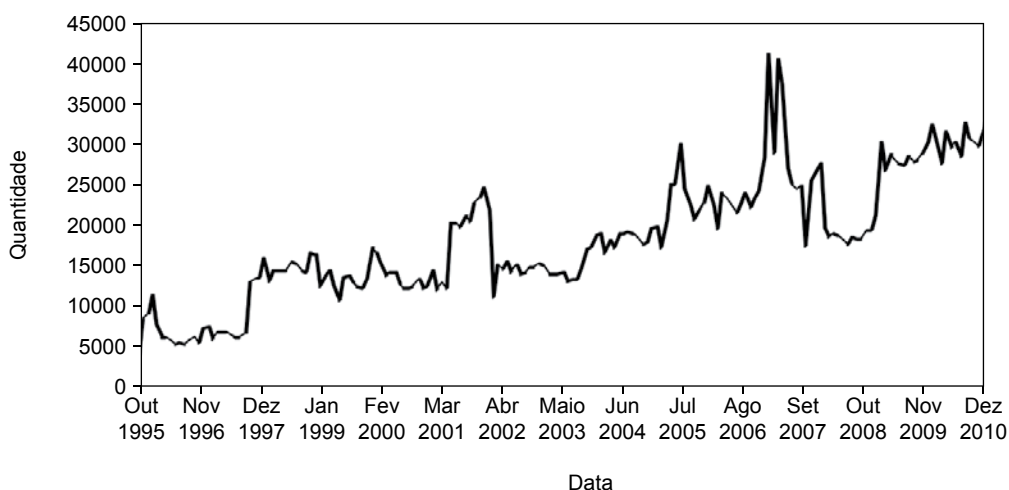
No Gráfico 5, observa-se que os resíduos estão distribuídos em torno da média zero e apresentam uma distribuição aleatória.

Gráfico 5 – Diagrama de dispersão dos resíduos *versus* ano

Estimação do quantitativo de RSU pela metodologia Box-Jenkins

Os resultados da metodologia Box-Jenkins mostram o modelo de série temporal que melhor se ajusta aos dados observados. Para investigar o comportamento dos dados, é apresentada a série temporal das quantidades de RSU, de acordo com o mês e ano (Gráfico 6).

Gráfico 6 – Série temporal das quantidades de RSU em toneladas de acordo com mês e ano



Pode-se observar que a média não é constante no tempo, sugerindo o estudo de processos não estacionários na média como os modelos ARIMA. Na Tabela 5, é apresentado o modelo que obteve o menor valor de AIC, SBC e EQM.

Tabela 5 – Modelo ARIMA e os critérios AIC, SBC e EQM

Modelo	AIC	SBC	EQM
ARIMA (2,1,1)	3396,3171	3412,3372	7021913,27

O Gráfico 7 mostra a série temporal real e a estimada pelo modelo ARIMA (2,1,1) das quantidades de RSU em toneladas, de acordo com o mês e ano. Observa-se que o modelo estimado acompanha o comportamento da série real. Em relação à análise residual, o Gráfico 8 indica que os resíduos que seguem uma distribuição aproximadamente normal, apesar de apresentar média zero, possuem altas variabilidades, o que pode interferir na qualidade da previsão.

Gráfico 7 – Série temporal real e estimada pelo modelo ARIMA (2,1,1)

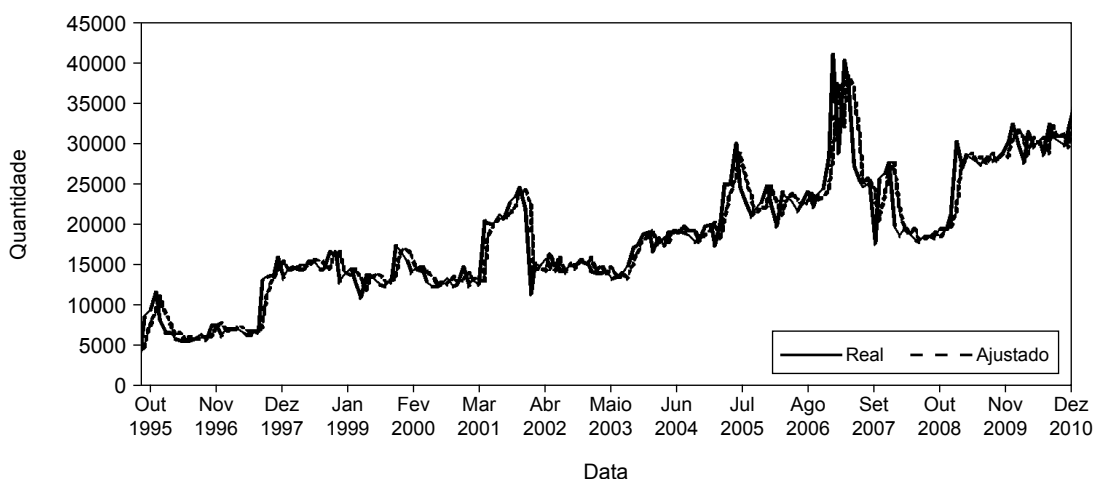
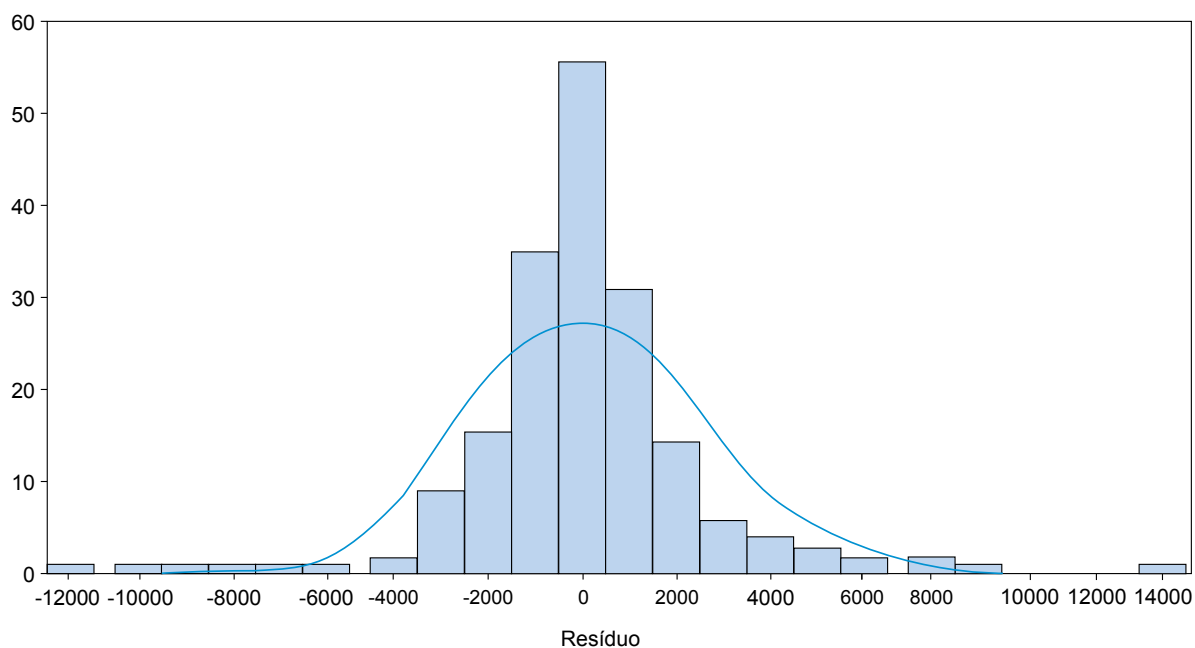


Gráfico 8 – Histograma dos resíduos do modelo ARIMA (2,1,1)



Estimativa da vida útil de células do aterro sanitário

Segundo memoriais da Célula VIII do aterro sanitário da Marca Ambiental Ltda., apresentados ao Órgão Ambiental (Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídrico - IEMA), foi adotado valor de peso específico dos resíduos dispostos de $0,70\text{t/m}^3$, conforme proposições de Jardim et al. (1995). Contudo, verificou-se que a taxa de ocupação do aterro, considerando os resíduos e a argila para recobrimento, vem se mostrando maior, pois as estimativas de vida útil apresentaram-se menores do que verificado na realidade, tendo-se o valor obtido, por meio de análises realizadas na empresa, de $1,20\text{ t/m}^3$.

De acordo com informações de projeto da célula VIII – fases de F a J – obtidas por meio da empresa Marca Ambiental, a média do volume dessas fases será de 460.000m^3 e 40 metros de altura, ocupando uma área de 11.500m^2 . Dessa forma, estabeleceu-se essa célula como padrão para analisar a quantidade de células que deverão ser construídas na CTR Marca até o período referente, para assim atender à demanda da população.

Os equivalentes em célula calculados de acordos com as projeções realizadas pelos modelos ARIMA (2,1,1) e regressão simples para o ano de 2020 foram de 9,5 e 8,54 células, respectivamente. Considerando a pior situação, ou seja, com 9,5 células, o aterro necessitará de 109.250m^2 para atender à demanda até este ano (2012). No entanto, atualmente, a Marca Ambiental possui projeto para cinco células (Célula VIII-Fases F a J), com área total de 83.330m^2 e com capacidade total de disposição final de $2.581.500\text{m}^3$. Como observado, essa área é menor do que a necessária (109.250m^2), conforme critérios considerados. Contudo, com esse volume e área totais previstos em projeto, tem-se uma altura média de 31m, valor este menor do que os 40m considerados para estimativa de área necessária de aterro sanitário realizada neste trabalho. Dessa maneira, recomenda-se, nesta área, que seja implementada verticalização sobre essas fases. Caso a empresa não opte por essa alternativa, será necessário o estudo de novas áreas para a implantação de novas células de aterro sanitário.

CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou conhecer a área e o equivalente em célula necessário para a CTR Marca atender à demanda de geração de resíduos sólidos urbanos propiciados pela população considerada, além do fato de ter fornecido projeções de quantitativos de RSU para anos futuros. Essas análises oferecem dados consistentes que revelam o crescimento da geração de resíduos ao longo dos anos e proporcionam um alerta para sociedade na sua geração exacerbada. Dessa forma, as informações contidas neste estudo são de grande relevância para o gerenciamento eficiente de RSU, considerando que o crescimento da geração de resíduos e a dificuldade cada vez maior de coletar, tratar e fazer sua disposição final sanitariamente segura fazem com que a gestão de resíduos sólidos urbanos tenha maior importância e espaço nas discussões técnicas da área de saneamento e meio ambiente. Recomenda-se o estudo de outros modelos de séries temporais para resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS

JARDIM et al. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Cempre, 1995.

MARCA AMBIENTAL LTDA. **Memorial descritivo**: célula de disposição final de resíduos classe II não perigosos (Célula VIII – FASES F/G/H/I/J). Vitória, 2011.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Previsão de séries temporais**. São Paulo: Atual, 1985.

MORIGAKI, M. M. **Indicadores de recuperação de material reciclável na unidade de triagem de Vitória/ES**. 2003. 171 f. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

WEI, W. W. S. **Time series analysis univariate and multivariate methods**. Canadá: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

Recebido em abril de 2012

Aceito em outubro de 2012

Correspondência para/Reprint request to:

Lucia Helena Sagrillo Pimassoni

Rua Elzira Vivácqua, 640, Jardim Camburi, Vitória, ES.

CEP.: 29090-350

E-mail: lhsagrillo@yahoo.com.br