

CONTRIBUIÇÃO AO PROCESSO DE GESTÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM ÁREAS URBANAS: PROPOSTA DE UM MODELO ESTATÍSTICO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.VII-007>

Tatiane Torres de Madeiro(*), Érico Gaspar Lisboa, Marco Valério de Albuquerque Vinagre

(*) UNAMA, 040602143@prof.unama.br

RESUMO

A gestão eficiente dos Resíduos da Construção Civil (RCC) representa um desafio crescente para os gestores urbanos devido ao alto volume gerado e aos impactos ambientais, sociais e econômicos associados. Este trabalho propõe um modelo estatístico preditivo com base na análise de variáveis urbanísticas e socioeconômicas, aplicadas à área urbana de Belém-PA. A metodologia compreende a definição e aplicação do Método de Regressão Estatística Linear (MREL), com validação estatística por meio de testes de significância, análise de resíduos e verificação de hipóteses de regressão. Os resultados indicam que as variáveis independentes explicam cerca de 70% da variação da geração de RCC, com confiabilidade de 99%. O modelo apresenta-se como ferramenta estratégica para o planejamento urbano sustentável, contribuindo para políticas públicas mais eficazes, redução do descarte irregular e melhor alocação de recursos.

PALAVRAS-CHAVE: modelo estatístico, gestão urbana, resíduos da construção, Belém, sustentabilidade.

ABSTRACT

The efficient management of Construction and Demolition Waste (CDW) represents a growing challenge for urban managers due to the high volume generated and the associated environmental, social, and economic impacts. This work proposes a predictive statistical model based on the analysis of urban and socioeconomic variables applied to the urban area of Belém, Brazil. The methodology includes the definition and application of the Linear Statistical Regression Method (LSRM), with statistical validation through significance tests, residual analysis, and verification of regression hypotheses. The results indicate that the independent variables explain approximately 70% of the variation in CDW generation, with 99% reliability. The model presents itself as a strategic tool for sustainable urban planning, contributing to more effective public policies, reduction of irregular disposal, and better resource allocation.

KEY WORDS: statistical model, urban management, construction waste, Belém, sustainability.

INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e o crescimento do setor da construção civil vêm gerando impactos diretos na paisagem urbana e no meio ambiente, especialmente pelo aumento expressivo na produção de Resíduos da Construção Civil (RCC). Estes resíduos, muitas vezes descartados de forma inadequada, representam um dos maiores volumes nos centros urbanos e, quando mal gerenciados, agravam problemas ambientais, econômicos e sociais (GIORDANO, 2004).

A gestão eficiente dos RCC exige estratégias integradas que envolvam planejamento urbano, políticas públicas e ferramentas de previsão confiáveis. Conforme destaca Gatti (2013), os espaços urbanos devem ser pensados a partir de sua função coletiva, o que inclui a infraestrutura necessária para lidar com os resíduos gerados. Nesse contexto, o uso de modelos estatísticos preditivos baseados em dados socioeconômicos e urbanísticos tem se mostrado uma alternativa viável para auxiliar gestores na tomada de decisão (COSTA, 2011).

A aplicação do Método de Regressão Estatística Linear (MREL) permite analisar relações entre variáveis e estimar padrões de geração de resíduos com base em características do território urbano. Segundo Sakata (2018), a previsão da

geração de RCC é fundamental para o planejamento de ações mais sustentáveis e para a redução do descarte irregular, além de permitir o dimensionamento adequado de equipamentos e serviços públicos.

Este trabalho propõe a construção de um modelo estatístico preditivo para a cidade de Belém-PA, considerando variáveis socioeconômicas e urbanísticas, com o objetivo de contribuir com uma metodologia técnica e replicável que auxilie na gestão dos resíduos da construção civil e no desenvolvimento urbano sustentável.

OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo desenvolver um modelo estatístico para estimar a geração de RCC em áreas urbanas. Para tanto, desenvolve-se procedimento metodológico que recorre a análise de variância de variáveis urbanísticas e socioeconômicas, as quais podem influenciar a produção de RCC. Aplicado na área urbana e mais verticalizada da cidade de Belém, estado do Pará, norte do Brasil, pretende-se ao final estabelecer ferramentas que podem auxiliar a gestão dos RCC.

METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida em três etapas de acordo com a Figura 1. Na primeira etapa definiu-se o método de regressão estatística linear (MREL). Em seguida, na segunda etapa, definiram-se as variáveis urbanísticas e socioeconômicas para estimar a geração de RCC. Para que a metodologia tenha um caráter prático, na terceira etapa efetuou-se a aplicação do modelo estatístico em bairros na área urbana da cidade de Belém/PA.



Figura 1. Etapas do procedimento metodológico a ser implementado.

Fonte: Autores do Trabalho.

Definição do Método de Regressão Estatística Linear – MREL

O MREL é implementado em quatro fases. Na primeira selecionam-se as variáveis independentes (X_i) ($i=1, 2, \dots, n$) que influenciam na estimação da variável dependente (Y_i). Para tanto, utilizam-se técnicas como o coeficiente de correlação (R), determinação (R^2) e ajustado (R^2_a), estimativa do C_p de Mallows, critério de Akaike, e demais autores (Montgomery et al. 2006). Pela segunda fase obtém-se o modelo matemático, cuja variação de Y_i seja explicada por n -variáveis, X_i . Pela extração de amostras da população se estima os parâmetros de X_i que podem explicar o comportamento de Y_i pela equação (1):

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \varepsilon_i \quad \text{equação (1)}$$

Onde β_0 e β_i se refere aos parâmetros de X_i . O termo ε_i é o erro na estimativa de $\hat{Y}_i$. Assim, a diferença (ΔY) entre Y_i e $\hat{Y}_i$ deve ser 0, onde $\Delta Y^2 = (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ é o desvio quadrático total.

Pela terceira fase estima-se β_0 e β_i pela técnica dos mínimos quadrados ordinários (MQO). Assume-se que β_0 e β_i devem ser BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator*), i.e., menor variância entre estimadores lineares não-viesados, não

violando as hipóteses de Gauss-Markov (HGM): modelo de regressão é linear em β_0 e β_i ; amostragem é aleatória; erros homocedásticos e tem distribuição normal; e, variáveis X_i não colineares entre si.

A quarta fase inclui a análise da variância (ANOVA), cujo desempenho do modelo é avaliado e a significância (α) de β_0 e β_i e $\hat{Y}_i$. O desempenho está relacionado aos erros de estimação de $\hat{Y}_i$ aferida pelo coeficiente R^2 e R^2_a . O termo α de β_0 e β_i é aferida pelo teste Student (teste-t). O teste Fisher-Snedecor (teste-F) avalia a significância de $\hat{Y}_i$, onde o modelo é relevante quando α estiver entre 1%-5%.

Para processar estas fases utilizou-se o *software* SisDEA[®] verificando: HGM, desempenho do modelo (R^2 e R^2_a) e o termo α de β_0 e β_i e $\hat{Y}_i$. Avalia-se homocedasticidade pelo teste de White. A normalidade de erros é aferida pela regra 3 σ : 1 σ [63%-73%], 1,64 σ [85% -95%] e 1,96 σ [95%-100%]. Avalia-se dados "outliers" e dados influenciadores pela estatística de Cook (Gazola, 2002).

Definição das variáveis urbanísticas e socioeconômicas

As variáveis independentes foram definidas como: índice de verticalização urbana dos domicílios em edificações multifamiliares (apartamentos) (X_1); pontos críticos de descarte irregular (X_2); renda média *per capita*—R\$/habitante (X_3); e, índice de bem-estar urbano—IBEU (X_4) (Ribeiro; Ribeiro, 2013). Adotou-se: $0,001 \leq \text{IBEU} \leq 0,700$ (pobre-P:1), $0,701 \leq \text{IBEU} \leq 0,800$ (regular-R:2) e $0,801 \leq \text{IBEU} \leq 1,00$ (boas-B:3). E, a variável dependente foi associado a geração de resíduos da construção civil (RCC), expressa em tonelada por mês (ton./mês). A variável dependente foi a geração de resíduos da construção civil (RCC), expressa em toneladas por mês (ton./mês). As variáveis X_1 , X_2 e X_3 foram obtidas de fontes secundárias, como bases de dados municipais e pesquisas urbanísticas.

A área de estudo apresenta ocupação mista, com setores verticalizados e regiões de moradias informais. O índice de bem-estar urbano (IBEU) varia entre 0,45 e 0,85, indicando desigualdades socioeconômicas. A renda média per capita oscila entre R\$ 800,00 e R\$ 3.500,00, refletindo disparidades no acesso a infraestrutura. Foram identificados 35 pontos críticos de descarte irregular, concentrados em áreas de menor IBEU. A geração de RCC varia de 120 a 750 ton./mês, com maior incidência nas zonas de intensa atividade construtiva.

RESULTADOS

Avaliação da modelagem estatística

Pelo *software* SisDEA[®] gerou-se 500 modelos. Aquele de melhor desempenho estimou R , R^2 e R^2_a em 0,8420; 0,7090; e, 0,6766, e α (%) das variáveis independentes foram aceitáveis. Adotando-se o princípio da parcimônia (Gujarati; Porter, 2011), as variáveis X_1 , X_2 , X_3 e X_4 explicaram cerca de 70% da variação da geração RCC na área de estudo.

Nesse contexto, a confiabilidade do modelo foi avaliada em torno de 99% ($\alpha=1\%$), possibilitando inferências robustas com base no Teste-F (21,92). O modelo não violou as HGM, e a análise dos resíduos indicou que os erros apresentaram distribuição normal (regra 3 σ : 1 σ [64%], 1,64 σ [90%] e 1,96 σ [95%]). A Tabela 1 apresenta ANOVA, testes e resultados da regressão linear.

Tabela 1. ANOVA, testes estatísticos e resultados da estatística de regressão linear.

Fonte: Autores do Trabalho.

Variável	Característica	Mín-Máx	Unidade	Modelo	β_i	Teste-t	α (%)	El*(%)
X_1	Domicílio/Apto	0,0-4708	Dom/Aptº	X_1	20,23	7,07	0,00	40,57
X_2	Pontos críticos	0-10	quant.	X_2	3696,8	6,44	0,00	15,74
X_3	Renda	480-5.505	R\$/hab.	X_3	-15,97	-4,97	0,00	-34,18
X_4	IBEU	1-3	código	X_4^2	1413,7	1,57	12,58	6,35
Y_i	RCC		ton./mês	Y_i	10544,4	1,08	28,82	-

*Elasticidade aferida em torno de 10% do valor médio de RCC.

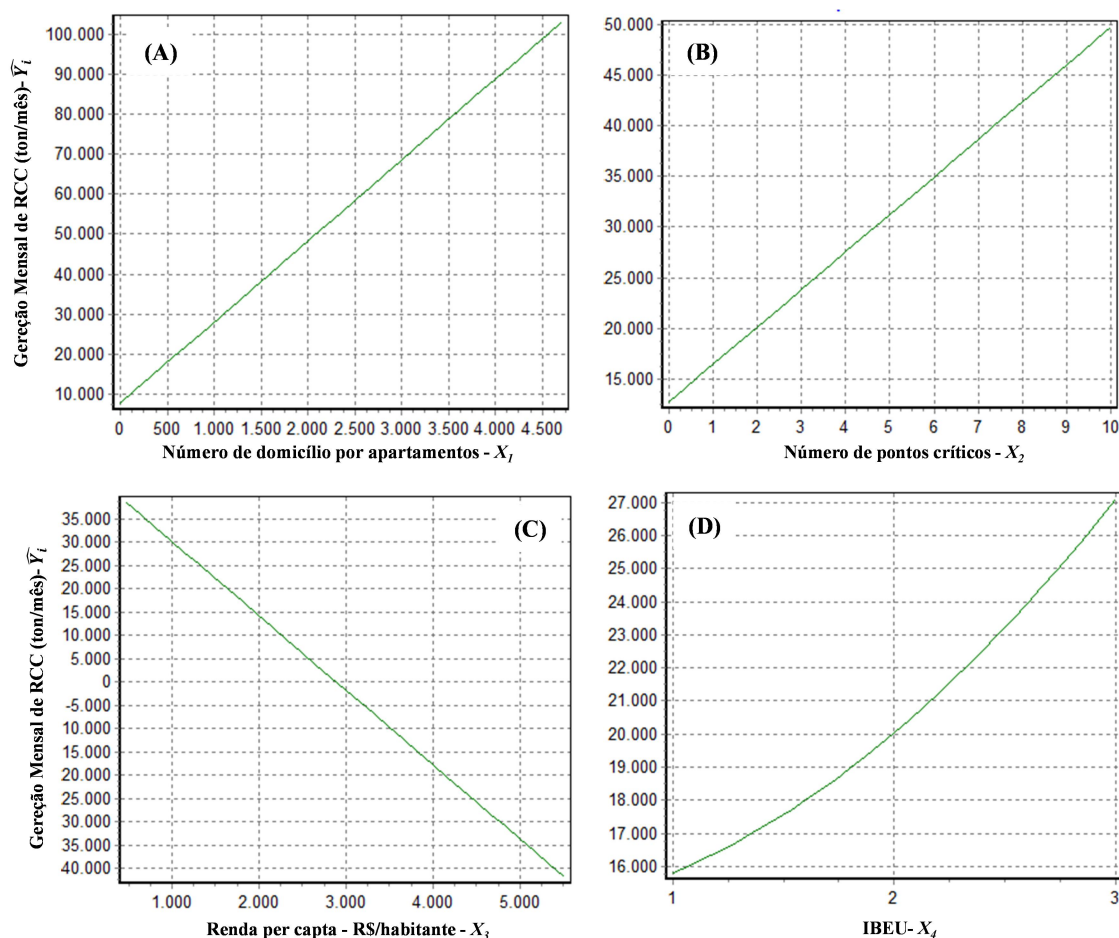
As variáveis independentes não se mostraram colineares, e menos de 5% da amostra apresentou valores "outliers". A distância de Cook não detectou dados influenciadores, e os erros foram homocedástico, reforçando a adequação do

modelo. Portanto, os resultados indicaram que o modelo foi eficiente e capaz de explicar a estimativa da geração de RCC na área urbana de Belém/PA.

Assim, com base nas variáveis selecionadas o modelo demonstrou incrementos positivos e negativos na geração mensal de RCC. Neste contexto, observou-se a relação entre a geração mensal de RCC e as variáveis explicativas do modelo na Figura 2.

Figura 2. Relação entre as variáveis independentes e a estimativa da geração de resíduos de RCC.

Fonte: Autores do Trabalho.



A quantidade de domicílios por apartamentos (X_1) apresentou impacto positivo na geração mensal de RCC. Assim, pode-se evidenciar que, a verticalização das cidades tem tendência de produzirem maior quantidade de resíduos em função do volume de materiais utilizados nas obras e reformas destas unidades. Nestes termos, na área urbana da cidade de Belém, em média, para cada 1 domicílio/apartamento é capaz de aumentar em cerca de 40% a geração mensal de RCC. 1 ton./mês Figura 2A.

O número de pontos críticos de descarte irregular (X_2) foram proporcionalmente relacionados a geral mensal de RCC. No cenário urbano, é sugestivo argumentar que tais evidências possam ser indicativos da necessidade de fiscalizações e ações educativas para conscientização da população, posto que, para cada 1 ponto de descarte irregular a um incremento na geração média mensal de RCC superior a 15% Figura 2B.

Por outro lado, na área urbana da cidade de Belém, o aumento da renda per capita (X_3) apresentou uma relação inversamente proporcional na estimativa de RCC. Essa constatação pode ser explicada pelo fato de que bairros de maior

renda produzem menor quantidade de resíduos ou ainda detém sistemas mais eficientes de gestão. A respeito, para cada 1R\$/habitante é um decréscimo em torno de 34% na geração mensal de RCC Figura 2C.

A melhoria das condições de bem-estar urbano (X_4) revelou que podem influenciar a geração mensal de RCC na área urbana da cidade de Belém/PA em quase 7%. Esta evidência pode ser explicada pelo fato de que as áreas urbanas com melhores condições de mobilidade, ambientais, habitacionais, serviços coletivos urbanos e de infraestrutura tendem a gerar maior volume de RCC Figura 2D.

Em geral, o modelo estatístico preditivo apresentou-se como uma ferramenta para estimar a geração de RCC em função das características urbanística e socioambientais. Desse modo, esta ferramenta pode auxiliar a gestão urbana e servir de instrumentos para a formulação de políticas públicas alinhadas aos princípios da sustentabilidade urbana.

CONCLUSÕES

O modelo estatístico desenvolvido demonstrou ser uma ferramenta eficaz para prever a geração de RCC em contextos urbanos, contribuindo para a melhoria das estratégias de gestão e minimização de impactos ambientais. A partir dos resultados obtidos, recomendam-se as seguintes medidas:

- Ampliação do banco de dados, incluindo diferentes regiões urbanas para aumentar a precisão do modelo;
- Incorporação de novas variáveis, como infraestrutura de reciclagem e legislação local sobre RCC;
- Aplicabilidade do modelo por gestores públicos, facilitando a tomada de decisões e a alocação eficiente de recursos;
- Promoção de campanhas educativas e aprimoramento da fiscalização, visando reduzir o descarte irregular de resíduos.

Ao integrar essas recomendações às práticas de gestão pública, será possível mitigar os impactos dos RCC, contribuindo para uma cidade mais sustentável e organizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. COSTA, R. N. **Parques fluviais na revitalização de rios e córregos urbanos**. 2011. 150f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Rio Grande, 2011.
2. GATTI, R. C. **Espaços públicos: diagnóstico e metodologia de projeto**. São Paulo: ABCP, 2013.
3. GAZOLA, S. **Construção de um modelo de regressão para avaliação de imóveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
4. GIORDANO, L. **Planejamento ambiental e parques lineares**. São Paulo: Editora Urbanismo, 2004.
5. GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924 p.
6. MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
7. RIBEIRO, L. C. D. Q.; RIBEIRO, M. G. **Índice de Bem-Estar Urbano (IBEU)**. Rio de Janeiro: Letra Capital/Observatório das Metrópoles, 2013.
8. SAKATA, F. G. **Parques urbanos no Brasil – 2000 a 2017**. 2018. 210f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.