LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

Modelagem da Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos Utilizando Técnicas de Dinâmica de Sistemas

Ítalo Campos Araújo
Instituto de Educação Tecnológica (IETEC)
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil
italocaara@hotmail.com

Eduardo Trindade Bahia
Instituto de Educação Tecnológica (IETEC)
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil
etbahia@gmail.com

Ronaldo Lamounier Locatelli
Fundação Pedro Leopoldo Educacional (FPL)
Pedro Leopoldo, Minas Gerais, Brasil
ronaldo.locatelli@yahoo.com.br

RESUMO

Os problemas decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos urbanos (RSU) têm sido um grande desafio para a cidade de Belo Horizonte. O município coleta em média 2.300 toneladas de RSU por dia e apenas 3,5% é encaminhado para reciclagem, deixando de gerar receitas e elevando os gastos com a aterragem. Neste artigo é proposto uma abordagem de Dinâmica de Sistemas para apoiar os tomadores de decisão na gestão de RSU. O modelo computacional desenvolvido, permite realizar análises dos processos que envolvem as variáveis do ambiente urbano. São simulados quatro cenários hipotéticos para prever o comportamento dos resíduos em diversas condições de tratamento. Além disso, é possível avaliar os resultados econômicos obtidos com a implantação de uma unidade de triagem e compostagem em conjunto com um aterro sanitário. Os benefícios dessa proposta vão além dos ganhos econômicos e administrativos, abrangendo também as esferas sociais, ambientais e legais do município.

PALAVRAS CHAVE. resíduos sólidos urbanos, dinâmica de sistemas, simulação.
Tópico (Simulação de Processos)

ABSTRACT

The problems arising from the inadequate management of solid urban waste (SUW) have been a major challenge for the city of Belo Horizonte. The municipality collects an average of 2,300 tonnes of SUW per day and only 3.5% is sent for recycling, failing to generate revenue and increasing spending on landing. This article proposes a Systems Dynamics approach to support decision-makers in the management of SUW. The computational model developed, allows us to perform analysis of the processes that involve the variables of the urban environment. Five hypothetical scenarios are simulated to predict the behavior of waste under different treatment conditions. Besides, it is possible to evaluate the economic results obtained with the implementation of a sorting and composting unit in conjunction with a landfill. The benefits of this proposal go beyond the economic and administrative gains, also covering the social, environmental and legal spheres of the municipality.

KEYWORDS. solid urban waste, systems dynamics, simulation.
Paper topics (Process Simulation)

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

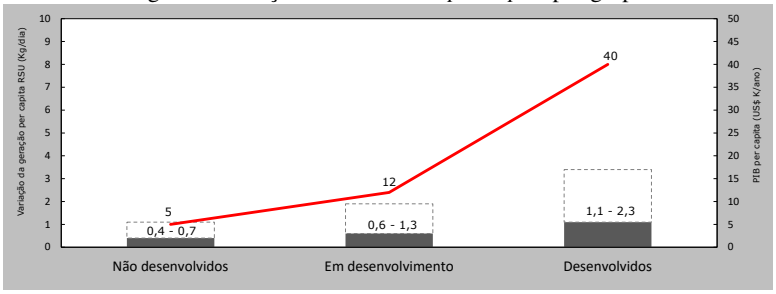
1. Introdução

Segundo o relatório do Banco Mundial [Hoornweg e Bhada-Tata, 2012] a gestão municipal de resíduos sólidos é o serviço mais importante que as cidades nos países em desenvolvimento podem oferecer. Sendo considerado o maior item orçamentário único e um dos maiores empregadores das cidades. A gestão dos resíduos sólidos geralmente é o único serviço que se enquadra completamente no âmbito do governo local. Uma cidade que não consegue gerenciar seus resíduos com eficiência raramente consegue gerenciar serviços mais complexos, como saúde, educação ou transporte. O relatório mostrou que em 2012 as cidades mundiais geraram cerca de 1,3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano e prevê que este volume aumente para 2,2 bilhões de toneladas até 2025.

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são gerados a partir de atividades domésticas, comerciais e institucionais. RSU refere-se a um desperdício comum, como restos de comida, papeis, plásticos, roupas, vidros, metais, madeiras, varreduras de rua, aparas de paisagens e árvores e resíduos gerais de áreas recreativas [Sadef et al., 2016]. A má gestão e o descarte inadequado podem causar impactos ambientais como: degradação do solo, poluição dos corpos e fontes de água, intensificação das inundações, contribuição para a poluição do ar, proliferação de doenças relacionadas a vetores de importância sanitária e também condições insalubres de trabalho [Jacobi e Besen, 2011].

O relatório da Bain & Company [2012] argumenta que o comportamento da geração *per capita* de RSU possui diferenças entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, as diferentes condições socioeconômicas mostram que os países mais desenvolvidos são os que mais geram resíduos. A Figura 1 mostra a relação estimada para o ano de 2010 entre a geração de RSU *per capita* em kg/dia (representada pelas colunas), e o PIB *per capita* em dólares americanos (US$ 1000/ano), representado pela linha sólida. A relação entre o PIB e a geração de RSU mostra que quanto maior o PIB *per capita*, maior será o consumo, e quanto maior o consumo maior será a geração de RSU. Existe uma grande amplitude no que se refere à geração de RSU dentre os países em desenvolvimento que varia de 0,6 kg/dia a 1,3 kg/dia. Para países desenvolvidos, essa amplitude é ainda maior compreendendo de 1,1 kg/dia a 2,3 kg/dia.

Figura 1: Geração de RSU e PIB *per capita* por grupos



Fonte: Bain & Company [2012]

Segundo Chalmin e Gaillochet [2009] algumas das principais conclusões da comparação entre países desenvolvidos e em desenvolvimento são variações entre o PIB *per capita*, legislação mais restritiva em países desenvolvidos, urbanização e fatores sócio-culturais (Quadro 1). Quanto mais rico o país, mais os seus resíduos contêm materiais de embalagem e produtos sofisticados, e menos desperdício de alimentos e, consequentemente, menos resíduos orgânicos e fermentáveis. Por outro lado, nos países pobres, os resíduos orgânicos representam entre 50% e 80% do total.

A Alemanha é umas das maiores geradoras de RSU na União Europeia, entretanto é extremamente bem desenvolvida em seu tratamento. Todo resíduo é tratado antes de ser enviado

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

Quadro 1: Comparação entre países desenvolvidos e em desenvolvimento

	Geração de RSU		Tratamento e Disposição Final de RSU
	Quantidade	Composição	
Países Desenvolvidos	• Entre 1,0 – 2,3 kg/dia *per capita*	• ≈ 30% orgânicos • ≈ 50% recicláveis:	• Máximo 60% de aterro • Combinações de aterro, tratamento térmico, compostagem/ reciclagem
Países em Desenvolvimento	• Entre 0,6 – 1,3 kg/dia *per capita*	• ≈ 60% orgânicos • ≈ 25% recicláveis:	• Principalmente aterro (> 85%) e/ou lixões • Máximo 10% de reciclagem
Variáveis que melhor explicam as diferenças	• Principalmente PIB *per capita* • Outras variáveis tais como urbanização legislação, clima e fatores sócio-culturais		• Legislação restritiva em países desenvolvidos

Fonte: Chalmin e Gaillochet [2009]

para o aterro, por meios térmicos, compostagem ou reciclagem. Os RSU na Alemanha são tratados da seguinte forma[1]: 42,7% são reciclados; 12,8% incinerados (recuperação de energia); 25,3% vão para a compostagem e apenas 19,2% vão para aterragem após sofrerem algum tipo de tratamento. O setor de reciclagem na Alemanha produz mais de 14% da demanda de matérias-primas, em forma de materiais reciclados, e com valor estimado em mais de 10 bilhões de Euros [Wendenburg, 2015].

Conforme os relatórios de Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil[2], em 2018, foram geradas 79 milhões de toneladas de RSU. Desse montante 72,7 milhões de toneladas foram coletadas, registrando um índice de cobertura de 92%. Deste total, 59,5% são encaminhadas para aterros sanitários, que se constituem como unidades adequadas para a destinação final dos resíduos. Ainda segundo o relatório, são gerados em média 1,039 kg/habitante/dia, totalizando 379 kg/habitante/ano. A região sudeste possui a maior taxa de geração, sendo 1,232 kg/habitante/dia. A distribuição espacial da geração de RSU depende da concentração populacional e da concentração de renda.

Em Belo Horizonte, no ano de 2019, foram coletadas 2.853 toneladas de RSU por dia, sendo 2.200 toneladas de resíduos domiciliar e público, 122 toneladas de entulho para reciclagem e 531 toneladas de resíduos da construção civil e volumosos. A geração de RSU *per capita* foi 0,8821 kg/habitante/dia [Magalhães et al., 2019]. Chung [2010] acredita que os resultados das projeções de RSU são frequentemente usados para justificar a formulação de medidas de políticas de gestão, planejamento de instalações de tratamento e reciclagem de resíduos e serviço de coleta. Munidos dos resultados, os tomadores de decisão ficam amparados para escolher a decisão mais assertiva. Dyson e Chang [2015] afirmam que a geração de resíduos é influenciada pelas condições econômicas e pelo tamanho da população. De acordo com Rong [2004], as práticas empregadas no Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (GRSU) variam consideravelmente entre os países. A combinação mais eficaz das práticas considera o tipo de material, bem como as condições ambientais e econômicas.

Considerando as condições anteriores, a gestão de RSU pode ser estudada como um problema de Dinâmica de Sistemas (DS), uma vez que as situações e as variáveis envolvidas mudarão ao longo do tempo. Forrester [1969] explica que a DS lida com ciclos de retroalimentação interna (*feedback*) e atrasos que afetam o comportamento do sistema como um todo. A DS pode acomodar os laços internos de *feedback* e os atrasos de tempo, como os necessários ao prever a geração e o tratamento de RSU. Este estudo apresenta uma abordagem de DS baseado no fluxo de resíduos proposto por Rong [2004], a fim de identificar soluções para o melhor gerenciamento dos RSU de Belo Horizonte. Esta abordagem visa fazer previsões sobre a quantidade de resíduos, revelar

[1] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Main_Page/pt
[2] http://abrelpe.org.br/panorama/

relações causais entre os fatores do gerenciamento de RSU e apresentar os benefícios econômicos do seu tratamento. Esse entendimento pode ser alcançado explorando as interações entre os fatores humanos, econômicos, ambientais e gerenciais, que são complexos e variam ao longo do tempo.

2. Desenvolvimento

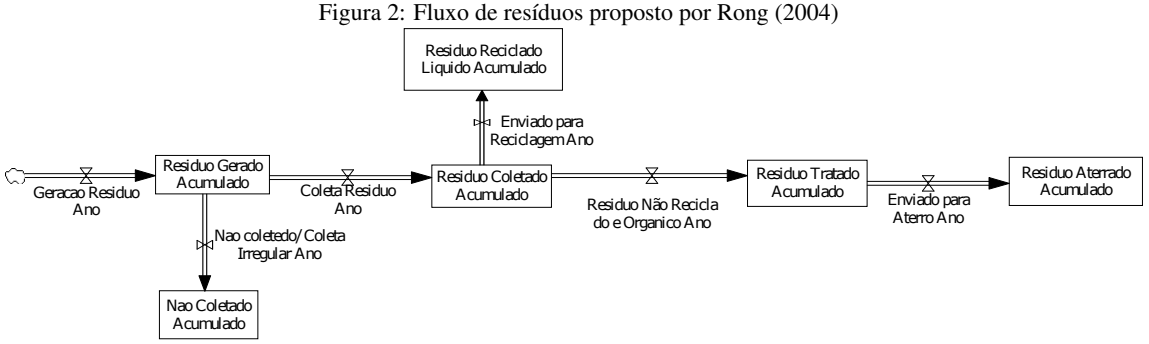
A metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento do modelo computacional foi baseada no fluxo de resíduos proposto por Rong [2004]. Foram realizados o levantamento bibliográfico e entrevistas com gestores da área de RSU, sendo possível caracterizar e estruturar o problema. O modelo foi validado por meio de um cuidadoso projeto experimental, a partir das análises de dados históricos relativos ao último censo demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica (IBGE[3]) em 2010, dados dos relatórios da ABRELPE, Fundação Getúlio Vargas, Superintendência de Limpeza Urbana (SLU), relatórios técnicos envolvidos no processo de gestão de RSU e também com a participação de pesquisadores e especialistas na área.

O modelo aqui apresentado permite aos gestores a definição de cenários, de acordo com a situação atual ou de sua conveniência. As decisões ou intervenções gerenciais podem ser testadas por meio de simulações. Os resultados obtidos permitem analisar possíveis alterações no fluxo de resíduos. Neste estudo, quatro cenários hipotéticos são construídos para prever o fluxo de RSU.

2.1. Modelagem do sistema

Para a construção e simulação do modelo foi utilizado o software Vensim® PLE, que utiliza o diagrama de blocos, para modelagem de sistemas complexos. Este diagrama é composto pelas variáveis de estoques e fluxos. O estoque representa o estado do sistema e seus valores só podem ser alterados por fluxos. A Figura 2 representa a estrutura do modelo original de Rong [2004], que exibe as principais variáveis de estoques do modelo e o fluxo de material entre eles.

Figura 2: Fluxo de resíduos proposto por Rong (2004)

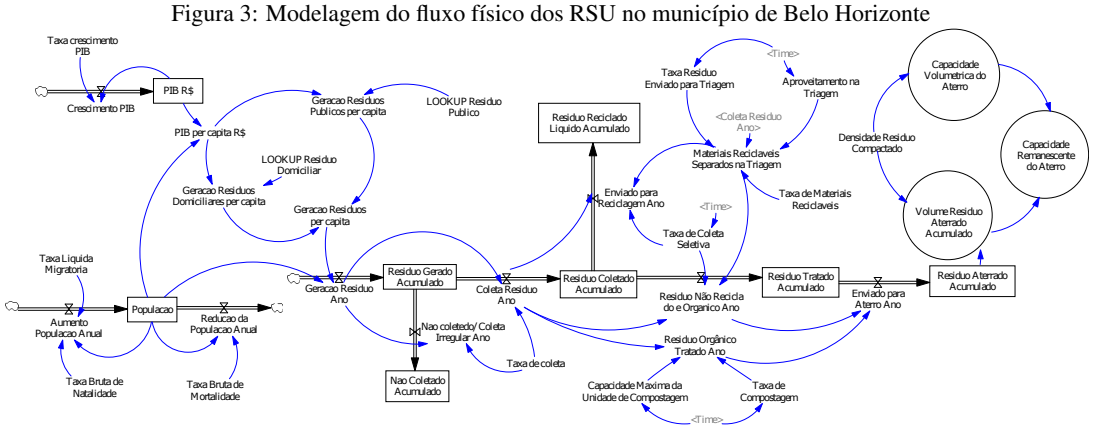


Fonte: Rong [2004]

Segundo Chung [2010] o PIB é uma variável explicativa válida para entender as quantidades diárias de RSU. Em suma, a geração de resíduos é influenciada pelas condições econômicas e pelo tamanho da população. Uma população maior definitivamente leva a um maior volume total de resíduos gerados. Sendo assim, três variáveis básicas do município de Belo Horizonte são consideradas: variação populacional, geração de RSU e o Produto Interno Bruto (PIB). Entende-se que a variável de maior dificuldade de controle é a variação do PIB, visto que foram observados dados nominais tanto de crescimento 17% (2007), quanto de retração -0,1% (2015). A população de Belo Horizonte cresceu a uma taxa média anual de 0,59%, enquanto no Brasil foi de 1,17%, no mesmo período segundo o IBGE. A geração de RSU corrente é 0,8821 kg/pessoa [Magalhães et al., 2019]. A Figura 3 apresenta o modelo computacional desenvolvido para simular a geração de RSU.

[3] https://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm

Figura 3: Modelagem do fluxo físico dos RSU no município de Belo Horizonte



A modelagem da população foi elaborada com base no crescimento vegetativo, considerando as taxas brutas de natalidade, mortalidade e as líquidas migratórias. Em 2017, a população estimada de Belo Horizonte era de 2.523.794 habitantes, sendo que 100% desta população vivia na área urbana. A modelagem do PIB foi obtida a partir de projeções extraídas do relatório de perspectivas do crescimento da economia brasileira de Tinoco e Giambiagi [2018], que apresenta um panorama atual sobre a economia brasileira, destacando a evolução recente e os principais desafios e, sobretudo, apresentando possíveis cenários de crescimento para o período de 2018 a 2023. A geração de resíduos *per capita* é influenciada pelo PIB *per capita* e é calculada por meio de uma função LOOKUP. Nesta função, para muitas variações do PIB *per capita* , a geração de resíduos *per capita* assume o valor correspondente mostrado na Tabela 2.

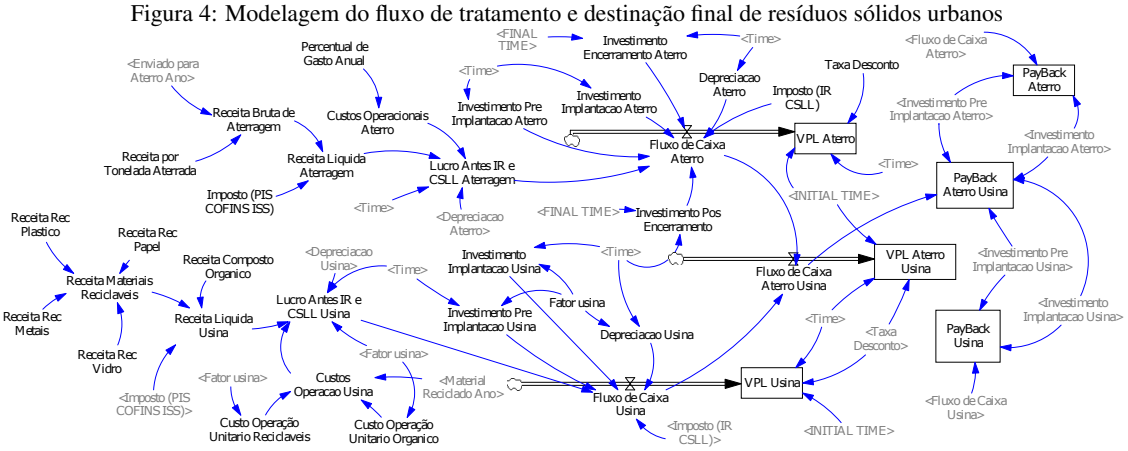
Tabela 2: Geração de resíduos *per capita* - LOOKUP

PIB *per capita* (R$/habitante)	Resíduos Domiciliares *per capita* $(kg/habitante/dia)$	Resíduos Públicos *per capita* $(kg/habitante/dia)$
até R$ 15.000	0,6273	0,1732
de R$ 15.000,01 até R$ 30.000	0,7029	0,1958
de R$ 30.000,01 até R$ 45.000	0,7424	0,2045
de R$ 45.000,01 até R$ 60.000	0,7840	0,3317
de R$ 60.000,01 até R$ 75.000	0,8280	0,3581
acima de R$ 75.001	0,8744	0,3865

Continuando a análise do modelo na Figura 3, a reciclagem e compostagem dos resíduos é influenciada pelas taxa de coleta, materiais enviados para Usina de Triagem e Compostagem (UTC) e pela composição gravimétrica do RSU. Os resíduos não reaproveitados pela reciclagem ou pelo tratamento orgânico são destinados ao aterro sanitário, que executam a aterragem dos resíduos a um valor por tonelada aterrada. A composição gravimétrica dos RSU domiciliares e públicos é bastante variada, em vista disso, para composição deste módulo foram expostos somente os principais resíduos comercializados pelo mercado belo horizontino, que são: composto orgânico e recicláveis (papelão, papel branco, embalagem longa vida, plástico rígido, plástico filme, PET, alumínio, aço e vidro).

Para estimar a construção e as características operacionais da UTC e do aterro sanitário no modelo, foram utilizados *Benchmark* de estudos consolidados. A Figura 4 mostra a proposta de modelagem do processo de implantação de uma UTC em conjunto com um aterro sanitário.

Figura 4: Modelagem do fluxo de tratamento e destinação final de resíduos sólidos urbanos



O estudo de viabilidade econômica foi desenvolvido admitindo-se parâmetros de dois estudos distintos. O primeiro corresponde aos investimentos de implantação e as despesas operacionais de uma UTC e também as receitas adquiridas com venda dos materiais, a partir de dados e informações de Gomes [2012]. O segundo corresponde às receitas adquiridas com a aterragem dos resíduos no aterro sanitário e também os investimentos de implantação, as despesas de operacionalização e encerramento do aterro de grande porte, fornecidos por Campos et al. [2009].

Os valores envolvidos nos estudos de referência foram corrigidos de acordo com o IGP-M (Índice Geral de Preços do Mercado[4]), sendo que os índices foram acumulados desde a data de publicação dos estudos. Este índice foi usado por ser adequado ao custo de oportunidade do capital imobilizado no investimento. Para a análise de viabilidade do empreendimento foi adotado o método do fluxo de caixa descontado e calculados o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* (tempo de retorno do investimento). O objetivo principal é detectar a viabilidade ou não de cada cenário e propor alternativas que propiciem a melhoria dos resultados.

Para Rong [2004], o horizonte temporal escolhido deve refletir o tempo pelo menos igual à vida útil dos maiores contratos, e também precisa ser consistente com a percepção humana do futuro. A vida útil da instalação de tratamento/eliminação de resíduos é normalmente de 20 a 30 anos. Com base nas considerações mencionadas, o horizonte de tempo do modelo de DS foi selecionado para ser de 20 anos, compreendendo o período entre os anos de 2018 a 2038.

2.2. Validação do modelo

Foi utilizada a técnica de validação de dados históricos para validar o modelo desenvolvido, que consiste em utilizar os dados coletados e verificar se o modelo se comporta como o sistema real. A validação foi realizada comparando os dados reais de seus elementos principais (população, PIB e geração de RSU *per capita*), com os resultados obtidos por meio das simulações, e também por meio de gráficos de correspondência entre as variáveis comparadas.

Comparando os dados reais com os resultados obtidos pela técnica de validação realizada entre os anos de 1999 e 2015, pode-se observar a aproximação dos dados estimados pelo IBGE. O resultado mostra que a população no censo de 2010, possui uma exatidão de 99,85%. O erro padrão de todo o período corresponde a 29.394 habitantes, conforme Tabela 3.

O valor de correspondência entre os resultados obtidos e os dados reais da população, PIB e RSU encontram-se respectivamente nos gráficos da Figura 5. Observa-se no primeiro gráfico,

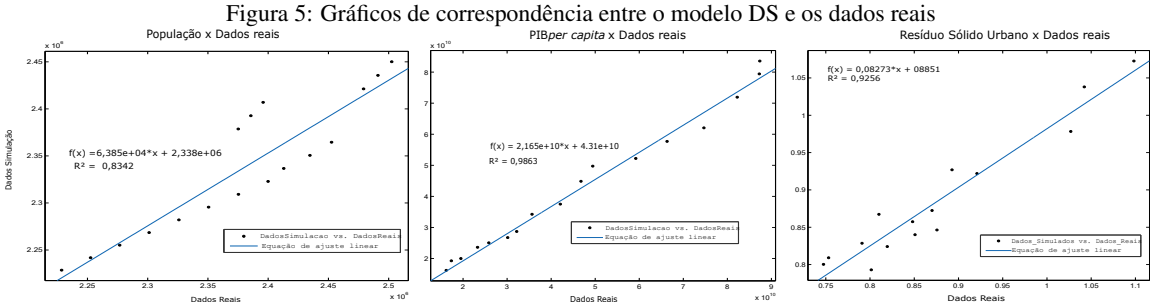
[4] https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/jsp/index.jsp

Tabela 3: Comparação modelo DS e dados reais - População (hab)

Ano	IBGE	Modelo	Ano	IBGE	Modelo	Ano	IBGE	Modelo
1999	2.228.588	2.228.590	2005	2.375.329	2.309.203	2011	2.385.640	2.392.732
2000	2.252.595	2.241.827	2006	2.399.920	2.322.919	2012	2.395.785	2.406.944
2001	2.276.761	2.255.143	2007	2.412.937	2.336.717	2013	2.479.165	2.421.241
2002	2.301.177	2.268.538	2008	2.434.642	2.350.597	2014	2.491.109	2.435.623
2003	2.325.900	2.282.013	2009	2.452.617	2.364.559	2015	2.502.557	2.450.090
2004	2.350.564	2.295.568	**2010**	**2.375.151**	**2.378.604**			

que existe uma correspondência (R^2) de 0,8342, isto significa que 83,42% da variável dependente consegue ser explicada pelos regressores presentes no modelo. O segundo gráfico apresenta uma correspondência de 98,54% entre os resultados obtidos e os dados reais do PIB. Esse resultado indica que o modelo de simulação pode ser usado para predizer o PIB de Belo Horizonte com alta precisão. Pode-se afirmar também que os valores estão fortemente correlacionadas com uma distribuição normal para a taxa de crescimento do PIB.

Figura 5: Gráficos de correspondência entre o modelo DS e os dados reais



A SLU apura os dados de RSU por meio da pesagem dos caminhões que realizam as coletas de resíduos domiciliares e públicos. Erros intrínsecos desse processo de pesagem geram divergências na correlação dos dados. Foi observada uma elevada variação na geração de resíduos públicos para o ano de 2009, com um aumento de 86% em relação a 2008 e também em 2012, uma redução de 52% em relação a 2011. Esses valores são discrepantes da média praticada para o período analisado, com variação absoluta de 16%. Após o tratamento desses dados observa-se no terceiro gráfico da Figura 5 que a variável geração de RSU *per capita*, possui uma correlação (R^2) de 92,56% com erro padrão (RMSE) de 0,0243 kg/habitante/dia.

2.3. Cenários simulados

Diferentes condições de tratamentos orgânico e reciclagem são introduzidas em quatro cenários a serem simulados até 2038, conforme características descritas na Tabela 4.

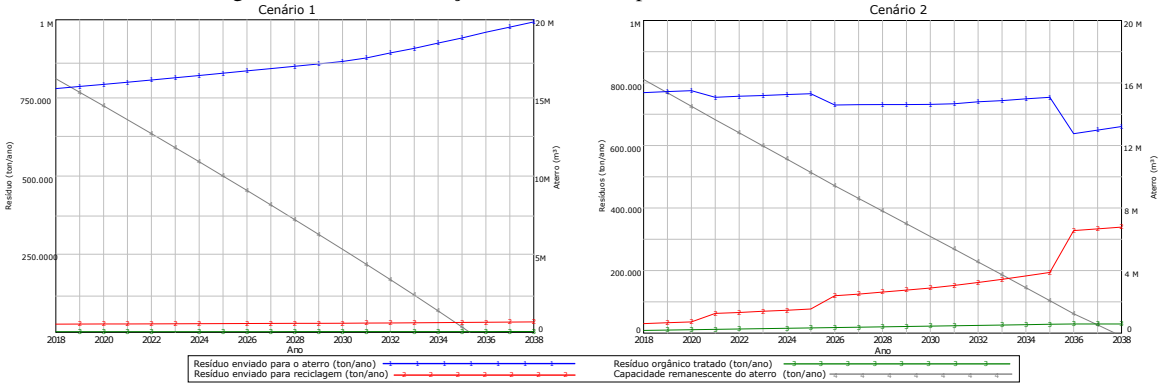
Tabela 4: Cenários hipotéticos de simulação considerando o RSU (kg/hab/dia) da Tabela 2

Cenário	Reciclagem (%)	Tratamento Orgânico (%)
Cenário 1	3,2%	0,25%
Cenário 2	Aumento de 3,2% a 33% até 2036	Aumento de 0,25% a 2,5% até 2036
Cenário 3	Aumento de 3,2% a 21,35% em 10 anos	Aumento de 0,25% a 12,65% em 10 anos
Cenário 4	Aumento de 3,2% a 42,7% em 10 anos	Aumento de 0,25% a 25,3% em 10 anos

O *Cenário 1* simula as condições do município considerando a manutenção das taxas de tratamento praticadas no ano de estudo. Pose-se observar na Tabela 4, que em média 96,5% de todo o resíduo coletado é enviado para o aterro sanitário, sem nenhum tipo de tratamento. Após a simulação, a população em 2038 é de 2.841.143 habitantes, com taxa de crescimento médio de 0,63% ao ano, valor pouco abaixo das projeções populacionais[5], que apresenta um crescimento de 0,56% ao ano. Essa divergência pode ser explicada pelo rápido envelhecimento da população, que caracteriza um arrefecimento continuado de seu ritmo de crescimento. O PIB *per capita* do município chegou a R$ 52.691, equivalente a uma taxa de crescimento nominal de 2,61% ao ano. A geração de RSU *per capita* atingiu o valor de 1,0335 kg/habitante/dia ao final da simulação, resultando em um aumento de 0,120 kg/habitante/dia, que corresponde a 13% em 20 anos. A vida útil do aterro é uma consideração importante para determinar a relação entre a quantidade da geração de RSU e o nível de tratamento aplicado a eles. No *Cenário 1*, a vida útil do aterro é deduzida na simulação através da variável "capacidade remanescente de aterro", o ano em que esta variável chega a zero representa o fim de sua vida útil. Pode-se observar no primeiro gráfico da Figura 6 que o aterro é colocado em uso no ano 2018 e sua capacidade cai para zero no ano 2036 após 18 anos da abertura do aterro.

O *Cenário 2* aumenta a capacidade de tratamento e propõe atender ao Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Belo Horizonte (PMGIRS-BH). As diretrizes são: ampliação da reciclagem e aproveitamento dos resíduos, modernização das Unidades de Triagem de resíduos recicláveis e otimização da Unidade de Compostagem para operar em sua capacidade máxima (80 toneladas/dia) e ampliação da taxa de coleta seletiva de 1,1% até 11,3%. Essas melhorias tiveram início em 2016 e fim em 2036, atingindo as taxas de tratamento dispostas na Tabela 4. A simulação do *Cenário 2* apresentada no segundo gráfico da Figura 6, mostra que a partir do ano 2036 é possível obter um aumento significativo no envio de materiais para reciclagem e também uma redução no material enviado para o aterro. Isso ocorre devido aos incentivos à coleta seletiva e, principalmente aos investimentos em alta tecnologia nas unidades de triagem. Esses investimentos prolongam a vida útil do aterro em dois anos, chegando ao fim de sua vida útil em 2038.

Figura 6: Gráfico destinação do resíduo e capacidade remanescente do aterro



Os RSU contêm quantidades significativas de materiais valiosos como o aço, o alumínio, o cobre e outros metais que, se forem recuperados e reciclados ou reutilizados, poderão reduzir o volume de resíduos enviados para o aterro sanitário e, ao mesmo tempo, gerar renda de revenda. Diante disso, o PMGIRS-BH possibilita um aumento significativo na geração de renda a partir do

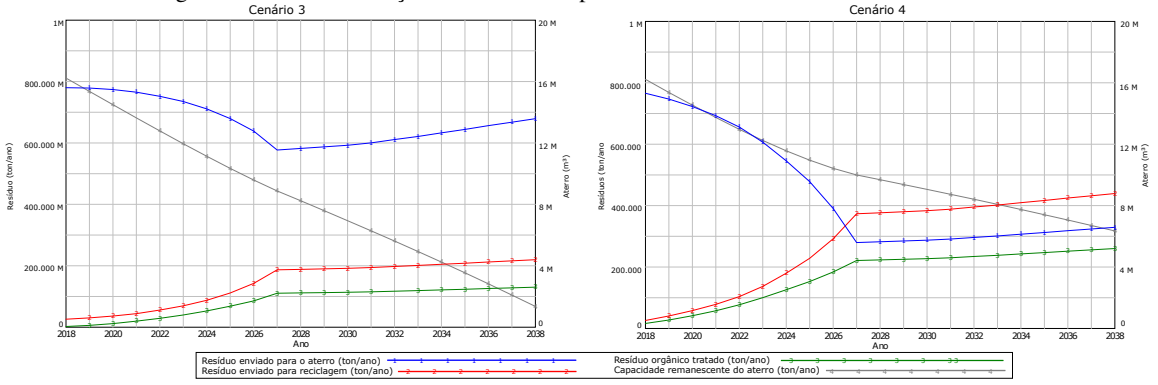
[5] http://fjpdados.fjp.mg.gov.br/demografia/#dados

incentivo ao Programa Municipal de Coleta Seletiva, juntamente com a etapa de triagem/destinação.

O *Cenário 3* otimiza os padrões de tratamento de RSU e propõe uma simulação onde os índices de reciclagem e compostagem sejam iguais a 50% do praticado pela Alemanha em 2017, conforme taxas da Tabela 4. Esses valores aumentariam gradualmente nos primeiros 10 anos e se manteriam nesses valores nos últimos 10 anos. Em decorrência do aumento da reciclagem e compostagem, ocorre em média uma redução anual de 22% no volume de material enviado para disposição final. Pode-se observar no primeiro gráfico da Figura 7, que a vida útil do aterro sanitário é prolongada além do horizonte de simulação, chegando em 2038 com 92% de sua capacidade.

O *Cenário 4* objetiva a excelência dos padrões de tratamento de RSU e faz referência aos padrões europeus, em especial aos resultados alcançados pela Alemanha. Está é uma simulação otimista, conforme as taxa de tratamento de resíduos explicitadas na Tabela 4. Esses valores aumentariam gradualmente nos primeiros 10 anos e se manteriam nesses valores nos últimos 10 anos. Por não ser prática do município utilizar a incineração dos resíduos para recuperação de energia, este dado não será considerado no modelo. Após a simulação observa-se no segundo gráfico da Figura 7 o expressivo aumento no tratamento dos RSU gerados pelo município, seja por reciclagem ou por compostagem. Consequentemente, tem-se no ano 2038 o tratamento de 68% de todo o montante coletado, sendo que apenas 32% dos resíduos são encaminhados para o aterro sanitário. A redução no envio de resíduos para o aterro prolonga sua vida útil para além do horizonte de simulação, chegando ao ano de 2038 com apenas 61% de sua capacidade ocupada.

Figura 7: Gráfico destinação do resíduo e capacidade remanescente do aterro - Cenário 4

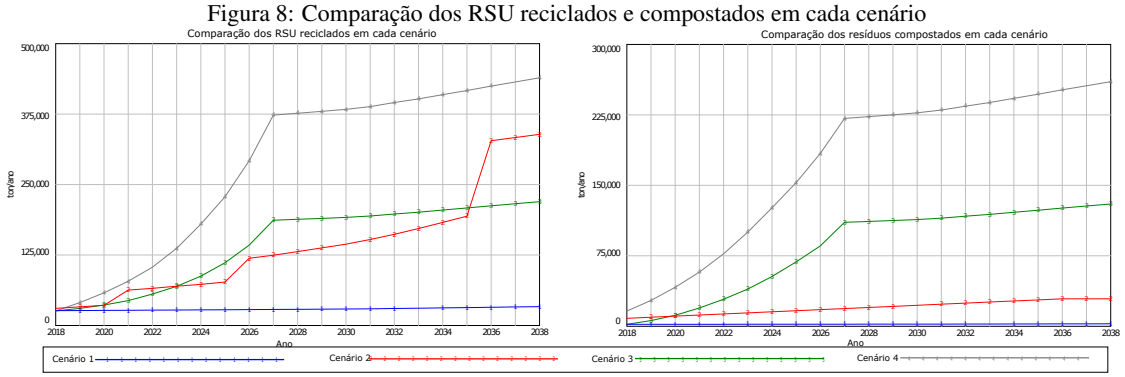


2.4. Comparação dos cenários: análise física e econômica dos RSU

A comparação dos quatro cenários avalia o incentivo de políticas públicas frente aos problemas enfrentados na gestão de resíduos urbanos. Na Figura 8 pode-se observar a evolução do tratamento dos resíduos dos quatro cenários propostos. Ao final da simulação observa-se no *Cenário 3* que o montante de material enviado para reciclagem é sete vezes maior que o *Cenário 1* e 35% menor quando comparado ao *Cenário 2*. Os *Cenário 2 e 4* se destacam pelo elevado volume de material destinado a reciclagem, no entanto esse número ainda é baixo se comparado aos países desenvolvidos. Em relação aos resíduos orgânicos compostados, o *Cenário 3* é 51 vezes maior que o *Cenário 1* e cinco vezes maior que o *Cenário 2*. Os resíduos orgânicos compõem em média 50% de todo o resíduo gerado pela população, todavia, os baixos investimentos dos órgãos públicos no tratamento destes resíduos não geram resultados significativos nos *Cenário 1 e 2*, obrigando a aterragem de resíduos que poderiam ser tratados e reaproveitados pela população.

Quanto maior o tratamento dos RSU, menor será a massa de material enviada para o aterro sanitário, consequentemente, maior será sua vida útil. O *Cenário 4* com suas elevadas taxas de

Figura 8: Comparação dos RSU reciclados e compostados em cada cenário



tratamento de resíduos dispõe para o aterro sanitário em média 46% menos resíduos que o *Cenário 1*. Ao final da simulação os *Cenário 2 e 3* dispõem respectivamente para o aterro 660.565 e 679.036 toneladas por ano. Apesar de próximos, a destinação em cada cenário é diferente, sendo que no *Cenário 2* são encaminhados para reciclagem 33% do montante coletado e no *Cenário 3* 21,3%. Em relação à compostagem dos resíduos orgânicos a situação se inverte, de modo que o *Cenário 2* trata apenas 2,5% e o *Cenário 3* realiza compostagem de 12,6% do montante coletado. Observa-se que o *Cenário 2*, com a política de metas da prefeitura, prolonga a vida útil do aterro sanitário até o ano de 2038. A vida útil do aterro nos *Cenário 3 e 4* se estendem além do horizonte de simulação. Estes se destacam pela redução no envio de resíduo sem tratamento para o aterro sanitário, devido ao alto nível de compostagem dos resíduos orgânicos. Os dados sumarizados são apresentados na Tabela 5.

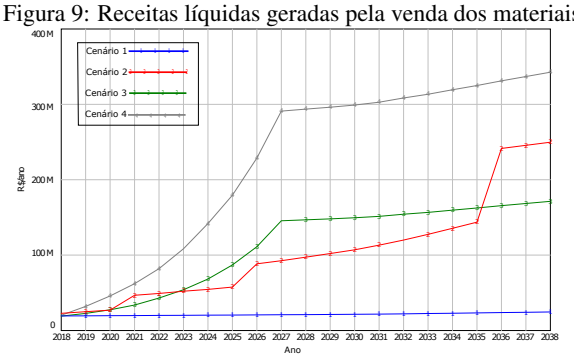
Tabela 5: Comparação entre a vida útil do aterro sanitário em cada cenário

Cenário	Vida útil (anos)	Ano de encerramento	Capacidade remanescente do aterro
Cenário 1	18	2036	0%
Cenário 2	20	2038	0%
Cenário 3	> 20	acima de 2038	8%
Cenário 4	>20	acima de 2038	39%

Os RSU têm grande potencial de geração de receita. O plástico se destaca como o maior gerador de receita, devido aos maiores valores de venda e também ao volume de material encontrado no resíduo da cidade. Os resíduos orgânicos compõem mais da metade do resíduo gerado pela população, contudo a receita gerada é menor. Se por um lado o município pode ganhar com o tratamento dos RSU, por outro lado o resíduo enviado para aterragem sem nenhum tratamento onera as contas públicas. A Figura 9 mostra a receita líquida gerada pela venda dos materiais recicláveis e do composto orgânico em cada cenário. O *Cenário 4* se destaca pelos elevados volumes de tratamento dos resíduos, obtendo geração de altos níveis de receitas. O *Cenário 2* se mostra com receitas elevadas devido ao aumento na destinação de resíduos para reciclagem, no entanto, os baixos investimentos no tratamento orgânico mantém as despesas oriundas da aterragem elevados.

A Tabela 6 expõe os valores do VPL, TIR e *Payback* simulados para a implantação da UTC e aterro sanitário. A implantação da UTC mostrou-se viável para os *Cenários 2, 3 e 4*, o VPL foi superior ao investimento inicial, indicando que o recurso investido será totalmente recuperado e trará ganhos econômicos para o empreendimento. A TIR encontrada para os três cenários foi superior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) (16%), ou seja, o custo de oportunidade compensa os riscos, os gastos envolvidos e a correção monetária. Já o *Payback* foi inferior a 10 anos de operação. Em

Figura 9: Receitas líquidas geradas pela venda dos materiais



relação à implantação de um aterro sanitário, os *Cenários 3 e 4* se mostraram inviáveis devido aos valores negativos retornados pelo VPL. O *Cenário 2* também apresentou-se inviável pois não atingiu uma TIR superior à TMA, esses valores são justificados pelo baixo volume de material enviado para aterragem. Já o *Cenário 1* apresenta-se viável com VPL de R$ 21,98 milhões e TIR igual a 24%. O *Payback* descontado para o *Cenário 1* é de 11 anos para retorno do valor investido.

Tabela 6: Resumo da análise financeira de cada cenário

Empreendimento	Análise	*Cenário 1*	*Cenário 2*	*Cenário 3*	*Cenário 4*
Usina Triagem e Compostagem	VPL (R$ Milhões)	-14,38	22,47	29,54	199,10
	TIR (%)	Não aplica	37%	40%	112%
	Payback (anos)	Não aplica	10	9	6
Aterro Sanitário	VPL (R$ Milhões)	21,98	2,46	-10,85	-53,15
	TIR (%)	25%	Não aplica	Não aplica	Não aplica
	Payback (anos)	11	14	Não aplica	Não aplica
Aterro Sanitário e Usina Triagem	VPL (R$ Milhões)	7,60	24,93	18,69	145,95
	TIR (%)	17%	23%	21%	45%
	Payback (anos)	13	12	12	8

3. Considerações finais

Este trabalho demonstrou a possibilidade de utilizar DS para gerenciar problemas complexos de gestão de RSU e também reduzir a incerteza futura do impacto de sua geração sobre a economia e o ambiente. Foi evidenciada a relação entre a riqueza da população e a geração de resíduos. Além disso, o modelo mostrou-se eficaz para avaliar o fluxo de RSU de Belo Horizonte.

A abordagem de apoio à decisão deste trabalho permite simular as consequências de diferentes planos alternativos para o tratamento e disposição final de resíduos sob vários cenários. Foram elaborados quatro cenários que representaram diferentes condições de tratamento e geração dos RSU. A partir do fluxo de RSU, encontrado em cada cenário, foi possível avaliar economicamente a proposta de implantação de uma UTC em conjunto com um aterro sanitário. Entretanto, o sucesso depende da correta adequação para o cenário normativo proposto. Dessa forma, os benefícios com a implantação de uma UTC irão além dos valores econômicos, compreendendo também, as esferas sociais, ambientais e legais. Além disso, melhores técnicas de recuperação podem ajudar a economizar recursos naturais valiosos e transformar resíduos em produtos úteis. Constatou-se que os investimentos para implantação de um empreendimento deste porte são elevados e nem sempre são recuperados. Em vista disso, sugere-se parceria público-privada e também a participação ativa

do poder público e da sociedade, mediante politicas públicas robustas que apresentem garantias de continuidade da operação do sistema a ser implantado.

De modo geral, a experiência internacional mostra que, para alcançar uma gestão adequada e sustentável de RSU, é necessária a implantação de estímulos que inibem tanto a capacidade de geração, por meio da promoção da redução, quanto o mau gerenciamento do volume gerado. Neste sentido, observa-se que o Brasil tem um longo caminho a percorrer, quando comparado aos países desenvolvidos. É notória a falta de ações efetivas das autoridades municipais, para colocar em prática os critérios estabelecidos e mudar a realidade do município.

Referências

Bain & Company (2012). Estudo econômico-financeiro para destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU). Technical report, Governo do Estado de Minas Gerais.

Campos, C. C., Simonsen, R., e Sandroni, P. H. (2009). Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação, operação e encerramento de aterros sanitários. Technical report, Fundação Getulio Vargas.

Chalmin, P. e Gaillochet, C. (2009). *From Waste to Resource: an abstract of World Waste Survey 2009*. Technical report, Cyclope e Veolia.

Chung, S. S. (2010). Projecting municipal solid waste: The case of hong kong sar. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11):759 – 768.

Dyson, B. e Chang, N.-B. (2015). *Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling*. *Waste Management*, 25(7):669 – 679.

Forrester, J. W. (1969). *Urban Dynamics*. MIT Press, 1st edition.

Gomes, M. T. B. (2012). Análise da viabilidade econômico-financeira da implantação de usina de triagem e compostagem no município de congonhas/mg. Master's thesis, UFPR.

Hoornweg, D. e Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. Technical Report 15, The World Bank.

Jacobi, P. R. e Besen, G. R. (2011). Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, 25:135 – 158.

Magalhães, R. C. S., Leite, M. J., e Gosling, W. (2019). Relatório anual de atividades de limpeza urbana. Technical report, Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte.

Rong, L. (2004). *Using system dynamics in decision support for sustainable waste management*. Master's thesis, National University Of Singapore.

Sadef, Y., Nizami, A. S., Batool, S. A., Chaudary, M. N., Ouda, O. K. M., Asam, Z. Z., Habib, K., Rehan, M., e Demirbas, A. (2016). *Waste-to-energy and recycling value for developing integrated solid waste management plan in Lahore*. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 11(7):569–579.

Tinoco, G. e Giambiagi, F. (2018). O crescimento da economia brasileira 2018-2023. Technical report, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

Wendenburg, H. (2015). A eficiência dos recursos e gestão da reciclagem: implementação na alemanha. In *Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil*. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings