

CARACTERIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS PARA RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL E NOS MUNICÍPIOS PAULISTAS

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Projeto: 800012/2016-0/Processo: 102194/2017-3

Gabriela Monteiro Rodrigues Spinola (UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq),

gamonteiomrs@gmail.com

Dr. Pedro Ribeiro de Andrade (CCST/INPE, Orientador e Coordenador)

pedro.andrade@inpe.br

Victor Fernandez Nascimento (CCST/INPE, Co-orientador)

victorfnascimento@gmail.com

Julho, 2017

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa do Brasil	15
Figura 2 - Mapa do Estado de São Paulo com limite dos municípios.....	16
Figura 3 - Comportamento das taxas de geração per capita fornecidas pela ABRELPE	30
Figura 4 - Curvas de crescimento da população urbana	32
Figura 5 - Comparação dos diferentes métodos nos diferentes cenários propostos.....	32
Figura 6 - Áreas necessárias para se dispor os RSU em aterro sanitário no Brasil no período de 2010 a 2030	34
Figura 7 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2017 – dados estaduais ABRELPE	37
Figura 8 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2037 – dados estaduais ABRELPE	39
Figura 9 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2017 – dados estaduais CETESB.....	40
Figura 10 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2037 – dados estaduais CETESB	41

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais critérios para avaliação preliminar de locais para disposição final.....	14
Tabela 2 - População brasileira 2010.....	17
Tabela 3 - fórmula do total de RSU gerado.....	19
Tabela 4 - Geração per capita.....	19
Tabela 5 - Geração per capita (ABELPE).....	20
Tabela 6 - Dados e parâmetros de projeto.....	22
Tabela 7 - Massas específicas de resíduos.....	23
Tabela 8 - RSU gerado (ABRELPE).....	26
Tabela 9 - Taxa de crescimento da geração per capita.....	26
Tabela 10 - Resultados das taxas de geração per capita para cada ano.....	26
Tabela 11 - Cenário 1 - Projeção da população a partir da população de 2010 e do RSU gerado, considerando um crescimento exponencial e o método das componentes demográficas.....	29
Tabela 12 - Total acumulado em relação à tabela 11.....	29
Tabela 13 - Projeção da população a partir da população de 2010 e do RSU gerado, considerando um crescimento exponencial e o método das componentes demográficas.....	31
Tabela 14 - Total acumulado em relação à tabela 13.....	31
Tabela 15 - Área (km ²) necessária para aterrar RSU do Brasil dos períodos indicados, e considerando o cenário 1.....	33

Tabela 16 - Área (km ²) necessária para aterrar o RSU do Brasil dos períodos indicados, e considerando o cenário 2.....	33
Tabela 17 - Divisão de classes dos mapas	34
Tabela 18 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km ² - 2017	36
Tabela 19 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km ² - 2037	38
Tabela 20 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km ² - 2017	40
Tabela 21 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km ² - 2037	41

RESUMO

O rápido crescimento da população mundial e o desenvolvimento econômico estão causando mudanças nos sistemas terrestres que podem apresentar consequências graves e duradouras. Uma delas é a grande quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerada, o que dificulta a capacidade do meio em decompor e reciclá-los através de processos naturais. Estimar a quantidade e qualidade de RSU é um dos grandes desafios a serem alcançados frente a atual realidade de problemas ambientais e da carência no sistema de gestão de RSU. Por este motivo o objetivo deste projeto foi identificar padrões na geração dos RSU do Brasil usando diferentes cenários. Neste estudo foram realizados métodos de projeções populacionais, bem como a previsão da taxa de geração de resíduos sólidos, com o intuito de mensurar a quantidade de RSU gerados para o Brasil até o ano de 2030 através de estimativas estatísticas. Em seguida, os métodos foram readequados para que os cálculos pudessem ser realizados a nível municipal para todos os municípios do estado de São Paulo. Para os dois casos, o resultado final baseia-se no dimensionamento de um aterro sanitário, ou seja, estimar o tamanho da área necessária para dispor adequadamente os resíduos gerados em um futuro próximo. No caso do Brasil, os resultados foram comparados com o tamanho do estádio do Maracanã (Rio de Janeiro), sendo que o mais significativo deles necessitaria de uma área equivalente à mais de 12 mil Maracanãs para dispor RSU durante o período de 2010 a 2030. Já no caso dos municípios de São Paulo, foi possível notar que São Paulo, Guarulhos e Campinas, respectivamente, são os maiores geradores de RSU do estado, ou seja, são os municípios que necessitariam das maiores áreas para dispor seus resíduos. Portanto, com essas estimativas os tomadores de decisão sejam eles governamentais ou não, poderão se basear nestes resultados para adequar as etapas de gerenciamento dos RSU, principalmente no que se refere à disposição final de resíduos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL.....	9
3.2 MEIOS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU	11
3.3 MODELOS NUMÉRICOS PARA ESTIMAR A ÁREA DE ATERROS SANITÁRIOS	13
4 MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 LOCALIZAÇÃO DO TERRITÓRIO – BRASIL	15
4.2 LOCALIZAÇÃO DO TERRITÓRIO – SÃO PAULO	16
4.3 RECURSOS UTILIZADOS	17
4.4 MODELO DE GERAÇÃO DE RSU PARA O BRASIL	17
4.4.1. Crescimento exponencial.....	17
4.4.2 Método das componentes demográficas	18
4.4.3 Cálculo da área para aterro sanitário.....	21
4.5 MODELO DE GERAÇÃO DE RSU PARA MUNICÍPIOS PAULISTAS.....	23
4.5.1 Estimativa populacional até 2037	23
4.5.2 Taxa de geração de RSU	25
4.6 CÁLCULO DAS ÁREAS PARA ATERROS SANITÁRIOS	27
4.6.1 Massa específica	27
4.6.2 Cenário 1	27
4.6.3 Cenário 2	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RSU PARA O BRASIL.....	28
5.1.1 Cenário 1	29
5.1.2 Cenário 2	30
5.2 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	31
5.3 ESTIMATIVA DA ÁREA DE ATERRO SANITÁRIO PARA O BRASIL.....	33
5.4 ESTIMATIVAS REFERENTES AOS MUNICÍPIOS PAULISTAS	34
5.4.1 Cenário 1	35
5.4.2 Cenário 2	39

5.4.3 Comparação de resultados	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

A problemática dos resíduos sólidos no meio urbano abrange alguns aspectos relacionados à sua origem e produção, sendo assim, temos que o resíduo sólido urbano (RSU) resulta da atividade diária do ser humano na sociedade e que os fatores que regem sua origem e produção são basicamente dois: o aumento populacional e a intensidade da industrialização (Lima, 2004).

O crescimento da população exige um incremento na produção de alimento e bens de consumo direto. A fim de suprir essa necessidade, o homem tende a transformar cada vez mais matéria-prima em produtos finalizados, o que gera então uma maior quantidade de resíduos que, disposto de maneira inadequada, comprometem a funcionalidade do meio ambiente (Lima, 2004).

Uma alternativa ambientalmente adequada para a disposição final desses resíduos gerados pela população, é o aterro sanitário, definido pela NBR 8419/1992 da ABNT basicamente como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, que não causa danos à saúde pública, visa minimizar impactos ambientais e utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área e volume possível. Para finalizar, os mesmos são cobertos por uma camada de terra que tem como função diminuir os maus odores, e evitar o contato dos resíduos com roedores, aves e insetos.

As propriedades dos resíduos sólidos urbanos como, o dimensionamento do tamanho, quantidade de matéria orgânica, potencial gerador de biogás e outras, são de difícil quantificação por serem considerados produtos heterogêneos, os quais variam de acordo com a localidade de coleta e com o tempo de degradação dos mesmos. Além disso, não há uma padronização dos procedimentos para este tipo de material, ou seja, a gestão de RSU, independente da maneira que o mesmo será disposto, é um trabalho que demanda estudo prévio dos componentes e de diversas técnicas que podem ser utilizadas para a realização de uma disposição adequada (Protasio, 2013).

Sendo assim, é evidente que os aterros sanitários são de suma importância na qualidade de vida, saúde e segurança da população no geral, além disso, ele possui uma capacidade grande de absorção diária de resíduos, condições especiais para a decomposição biológica da matéria orgânica presente no mesmo e também proporciona a disposição final adequada (Lima, 2004).

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste projeto foi num primeiro momento identificar padrões na geração dos resíduos sólidos urbanos para o Brasil e num segundo momento a nível municipal para o estado de São Paulo, para que então, através da elaboração de diferentes cenários possamos estimar as áreas necessárias para dispor os RSU de forma adequada em aterros sanitários.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Elaborar um modelo para calcular o tamanho da área necessária para dispor os resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil de 2010 até 2030 em aterro sanitário.
2. Elaborar um modelo para calcular o tamanho das áreas necessárias para dispor os resíduos sólidos urbanos de forma adequada em aterros sanitários para os municípios do estado de São Paulo de 2010 até 2037.
3. Analisar as mudanças e verificar se houve crescimento em relação às áreas necessárias para disposição de RSU tanto para o Brasil quanto para os municípios.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

O modelo de gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil apresenta inúmeros problemas em diversas regiões do país, principalmente na estruturação da coleta domiciliar, na limpeza de logradouros públicos e na destinação adequada dos resíduos coletados, ou seja, tais etapas ainda precisam ser vencidas, pois a produção de RSU é crescente e os padrões atingidos pela reciclagem ainda são pouco significativos (Andrade, Ferreira, 2011).

Apesar de haver forte tendência de se adotar um modelo de gestão de resíduos sólidos que se assemelhe ao dos países desenvolvidos, com diversas alternativas consolidadas para o resíduo antes do mesmo ser encaminhado para a disposição final, a situação geral dessa gestão apresenta-se atualmente bastante diferente da encontrada nos Estados Unidos, no Japão e na União Europeia, que são os maiores geradores mundiais de RSU (Andrade, Ferreira, 2011).

No que se refere à geração de resíduos sólidos urbanos, segundo a Agência Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2015 foram geradas cerca de 79,9 milhões de toneladas no Brasil, número este que não é totalmente contemplado por uma cobertura de coleta, a qual só consegue atender por volta de 90% da demanda de RSU gerado.

Os motivos para a geração de RSU no Brasil apresentar resultados tão altos são diversos, porém, podemos destacar o padrão de consumo da sociedade atual como um dos principais. O consumo apresenta-se como um objeto de estudo relativamente novo, mas de suma importância, pois exerce um papel de influência nas maneiras de pensar, agir e sentir do ser humano (Figueiredo, Godecke, Naime, 2012).

É característica da sociedade atual a criação de “necessidades” pela forte atuação de interesses particulares no estímulo dos indivíduos às práticas de consumo. Os atos de consumir e descartar ocorrem rápida e sucessivamente, pois sempre há algo mais novo, cuja posse, trará a felicidade e bem-estar prometidos pela propaganda (Figueiredo, Godecke, Naime, 2012).

Seguido desse pensamento, vem questão da quantidade de resíduos encaminhados para a disposição final, que segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), de maneira geral, houve um aumento de cerca de 35% em um intervalo de oito anos (2000-2008).

Além disso, em números absolutos e no índice de disposição ambientalmente adequada em 2015: cerca de 42,6 milhões de toneladas de RSU, ou 58,7% do coletado, seguiram para aterros sanitários, que é uma das principais metodologias utilizadas para dispor o resíduo. Por outro lado, em relação à destinação inadequada, quase 30 milhões de toneladas de resíduos foram dispostas em lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2015).

Já em relação às regiões brasileiras que mais geram resíduos sólidos urbanos no país, é tida como destaque a região sudeste, onde os 1.668 municípios da região em questão geraram, em 2015, a quantidade de 107.375 toneladas/dia de RSU, das quais 97,4% foram coletadas (ABRELPE, 2015)

Dentro do modelo de regiões que mais geram resíduos no Brasil, deve-se destacar o estado de São Paulo, que além de ser o estado que apresenta o maior PIB do país, é também o estado mais populoso, fator esse que influencia na quantidade de geração de RSU bem como o padrão de consumismo de sua população.

Segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo (CETESB, 2014), os índices de geração per capita (kg/hab/dia) em função das faixas populacionais comprovam que o número de habitantes em cada região interfere diretamente na quantidade de RSU gerada: municípios com até 25.000 habitantes tem um índice de 0,7, municípios com 25.001 até 100.000 habitantes tem um índice de 0,8, municípios com 100.001 até 500.000 tem um índice de 0,9 e municípios com mais de 500.000 possuem um índice de geração per capita de 1,1.

3.2 MEIOS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10) define a destinação final ambientalmente adequada como sendo a distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários, observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. Porém, apenas uma parte dos resíduos sólidos gerados são realmente destinados para os aterros sanitários, sendo assim, existem outras maneiras de destinação final de RSU, as quais podem não ser ambientalmente adequadas.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 realizada pelo IBGE, considerou como unidades de destinação final: aterros controlados, aterros sanitários, unidades de compostagem, unidades de tratamento por incineração,

unidades de triagem para reciclagem, vazadouros a céu aberto, vazadouros em áreas alagáveis, e outras unidades de destinação.

O aterro controlado é considerado um meio de disposição final de RSU considerada ambientalmente inadequada, principalmente pelo potencial poluidor representado pelo chorume, que não é coletado nem tratado neste tipo de destinação de RSU (IBGE, 2004).

Já o aterro sanitário é considerado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017) uma obra de engenharia que tem como objetivo acomodar no solo resíduos no menor espaço prático possível, causando o menor dano possível ao meio ambiente ou à saúde pública. Essa técnica consiste basicamente na compactação dos resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte.

O objetivo principal do aterro sanitário é o de melhorar as condições sanitárias relacionadas aos descartes sólidos urbanos evitando os danos da sua degradação descontrolada. Além disso, ele deve operar de modo a fornecer proteção ao meio ambiente, evitando a contaminação das águas subterrâneas pelo chorume e evitando o acúmulo do biogás resultante da decomposição anaeróbia do resíduo no interior do aterro.

Ainda sobre o aterro sanitário, é possível afirmar que suas principais características segundo a Cetesb são: impermeabilização da base do aterro, que evita o contato do chorume com as águas subterrâneas; instalação de canais de saída de gases do interior do aterro; sistema de coleta de chorume, o qual é enviado a lagoas previamente preparadas com impermeabilização do seu contorno ou enviados para tanques de armazenamento fechados; sistema de tratamento de chorume e sistema de drenagem de águas pluviais.

De acordo com outro meio de destinação final de RSU, a compostagem, deve-se destacar a especificidade dessa metodologia, uma vez que a mesma trata apenas de materiais orgânicos, os quais são degradados a partir do processo de digestão aeróbia. Existem basicamente três etapas a serem seguidas: pré-triagem, triagem e disposição do material na câmara de compostagem, e assim, a eficiência do processo global depende das condições de operacionalidade de cada uma delas como, por exemplo, temperatura e umidade (Baptista, Puna, 2008).

Em relação às unidades de tratamento por incineração, para que o processo seja concluído, uma central incineradora deve conter sistemas de tratamento dos gases de combustão e uma central de co-geração, que pode, por exemplo, gerar eletricidade a partir da energia térmica existente no vapor de água produzido. O RSU é então utilizado como combustível e queimado com o oxigênio do ar, sendo necessário também, controlar a temperatura e o tempo de resfriamento dos gases resultantes da queima dos RSU (Baptista, Puna, 2008).

Por fim, os vazadouros, também conhecidos como lixões, são muito recorrentes no Brasil, principalmente em locais onde não existe coleta seletiva ou em municípios carentes em relação à gestão adequada de RSU. Neste caso é possível identificar uma forma de deposição desordenada, sem a devida compactação do resíduo e sem cobertura, o que acentua os problemas de contaminação do solo, do lençol freático, odores e a proliferação de macro e micro vetores (Almeida, Junior, Kimura, Tada, 2009).

3.3 MODELOS NUMÉRICOS PARA ESTIMAR A ÁREA DE ATERROS SANITÁRIOS

Para que seja possível a realização de uma projeção da área de aterros sanitários, existem dois parâmetros principais que devem ser considerados: quantidade total de RSU gerada em um determinado local (toneladas/dia) e geração per capita gerada em determinado local (kg/hab/dia ou ton/hab/dia) (Bardhan, Goel, Hazra, Ranjan, 2017).

Deve-se supor que o crescimento exponencial se aplica em todas as situações relacionadas ao aumento populacional, ou seja, $N=N_0 \exp(kt)$, onde N =população no tempo t ; N_0 =população no tempo $t=0$; k =taxa de crescimento exponencial anual (1/ano), que é definida por $k=\ln(N/N_0)/t$; t =tempo, anos (Bardhan, Goel, Hazra, Ranjan, 2017).

Na sequência, são necessários os dados e parâmetros do projeto, que são as características específicas para a construção de cada aterro segundo o local em que o mesmo será instalado. Os dados de projeto são: a média diária de lixo, o peso específico e a redução volumétrica. Já os parâmetros de projeto são relacionados à disposição do lixo, ou seja, camada de resíduo, camada de cobertura e altura total da célula (Curty, 2005).

Para finalizar são realizados os cálculos, considerando uma certa porcentagem de ocupação do lixo compactado, para que possa ser estimado o volume de lixo na descarga, o volume de lixo compactado, o volume diário do aterro e por fim, a área total do aterro (Curty, 2005).

Além do dimensionamento da área do aterro, existem padrões de segurança que devem ser seguidos durante o projeto. A tabela 1 a seguir (NBR 13896) fornece os principais critérios para avaliação das áreas para instalações, implantações e operações de aterros sanitários, e também estabelece as condições mínimas exigíveis para proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas.

Tabela 1 - Principais critérios para avaliação preliminar de locais para disposição final

Itens analisados	Classificação dos locais		
	Recomendado	Recomendado com restrições	Não recomendado
Vida útil	> 10 anos	10 anos, a critério do órgão ambiental	< 500 m
Distância do gerador	> 500 m	< 500 m	< 500 m
Distância de núcleos habitacionais	Baixa	Média	Alta
Zoneamento ambiental	Áreas s/ restrições	Áreas s/ restrições	Unid. De conserv. Ambien. E correlatas
Zoneamento urbano	cresc. Mín	cresc. Inter.	cresc. Máx.
Uso e ocupação de terras	Áreas devolutas um pouco utilizadas	Áreas devolutas um pouco utilizadas	Ocupação intensa
Valor da terra	Baixo	Médio	Alto
Aceitação popular e de suas entidades	Boa	Razoável	Inaceitável
Distância aos cursos d'água	> 200 m	< 200 m, c/ aprovação do órgão responsável	< 200 m, c/ aprovação do órgão responsável
Declividade	1-20%	< 1% ou > 20%	< 1% ou > 20%
Profundidade do nível d'água	3 m	1,5 m	< 1,5 m
Condutividade hidráulica do subsolo	10-9 m/s ou 10-8 m/s	5 x 10-7 m/s	> 5 x 10-7 m/s

Fonte: ABNT NBR 13896

Por fim, é necessário destacar que o modelo de cálculo aqui apresentado toma como referência o fato de que os resíduos sejam enterrados numa espécie de paralelepípedo, que é a maneira mais comum e mais prática de realizar o dimensionamento (Mancini, 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO DO TERRITÓRIO – BRASIL

A primeira etapa do presente projeto, tem seus cálculos e projeções baseadas no território nacional.

Segundo as estimativas do IBGE, o Brasil tinha no ano de 2015 aproximadamente 204 milhões de habitantes (IBGE, 2015), vivendo em cinco regiões (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul) e distribuídos em uma área de 8.515.767,049 km² (Figura 1). A distribuição populacional no território nacional é bastante desigual, com concentração da população nas zonas litorâneas e na região Sudeste.



Figura 1 - Mapa do Brasil

Fonte: Território Nacional – IBGE: Diretoria de Geociências, Coordenação de Cartografia, 2017.

4.2 LOCALIZAÇÃO DO TERRITÓRIO – SÃO PAULO

A segunda parte do projeto contempla o estado de São Paulo e seus municípios como área de estudo. Localizado na região Sudeste do Brasil que possuía em 2015, segundo estimativas do IBGE, um total de 85.745.520 habitantes, São Paulo é o estado mais populoso de todo o território nacional, com 44.396.484 habitantes nesse mesmo ano.

O estado em questão faz divisa com os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraná e Mato Grosso do Sul e também é banhado pelo oceano Atlântico (Figura 2). Além disso, o território é dividido em 645 municípios, e sua área total é de aproximadamente 248 mil km², o que equivale a quase 3% do território do Brasil.

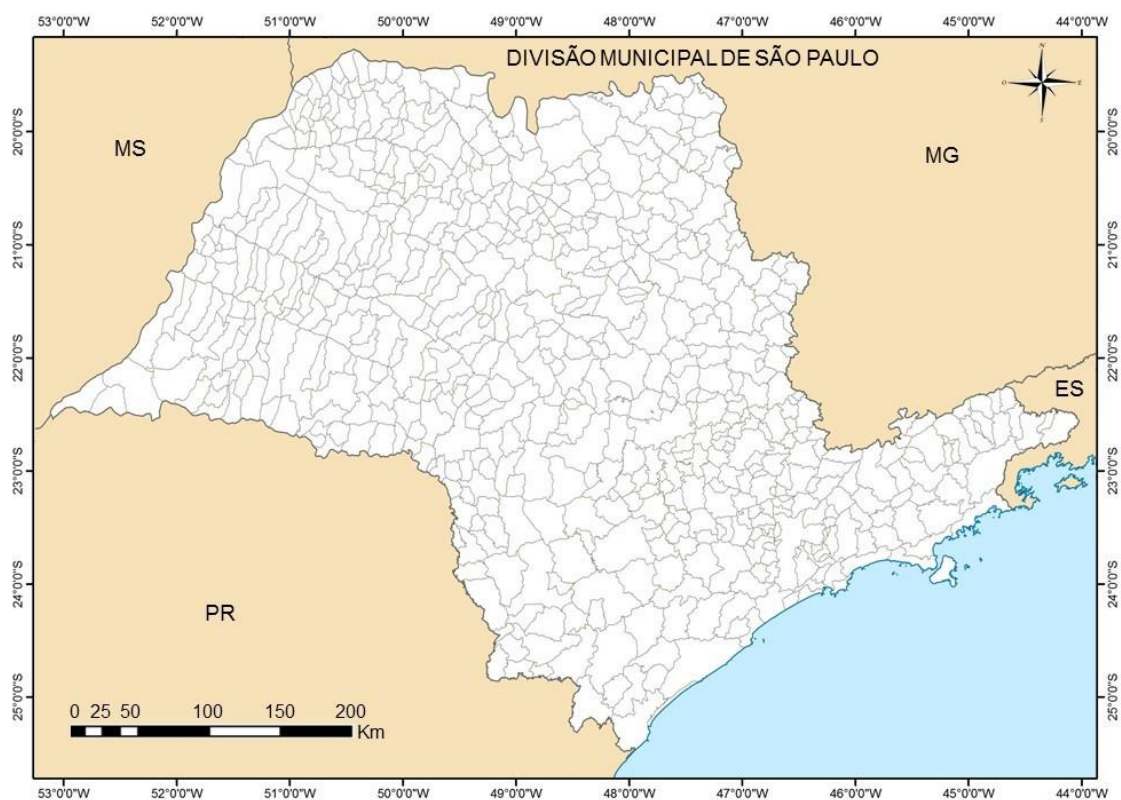


Figura 2 - Mapa do Estado de São Paulo com limite dos municípios
Fonte: (IBGE, 2015)

4.3 RECURSOS UTILIZADOS

Para a realização do estudo atual foram utilizados os seguintes recursos:

- Computador Dell, Windows 10, Intel Inside Core i5
- Microsoft Office Excel para os cálculos;
- Execução de determinados mapas com auxílio do software ArcGis;

4.4 MODELO DE GERAÇÃO DE RSU PARA O BRASIL

O estudo se inicia com o objetivo de dimensionar o tamanho de um aterro sanitário que seria necessário para receber todo o resíduo sólido urbano gerado a partir de 2010 até o ano de 2030 no Brasil, totalizando um período de 20 anos.

A projeção do resíduo sólido gerado no Brasil no intervalo de 2010 a 2030 teve como ponto de partida a população brasileira no ano de 2010 (**Tabela 2**). Para as projeções da população considerou-se um crescimento exponencial e o método das componentes demográficas utilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Tabela 2 - População brasileira 2010

	2010	Fonte
População Urbana	160.925.792	Censo 2010, IBGE
População Total	195.497.797	Projeção da população, IBGE

Fonte: IBGE, 2010

4.4.1. Crescimento exponencial

A Equação 1 extraída do artigo Forecasting Solid Waste Generation Rates (Bardhan, Goel, Harza, Ranjan, 2017) descreve o crescimento exponencial:

$$N = N_0 * \exp(k * \Delta t) \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo,

N : população no tempo t (habitantes);

N_0 : população no tempo 0 (habitantes);
 k : taxa exponencial anual de crescimento (1/ano);
 Δt : tempo $t - t(0)$ (anos).

A Equação 2, obtida a partir da Equação 1, fornece a taxa exponencial de crescimento total e a taxa de crescimento urbano da população, k_u :

$$k_u/k_t = \frac{\ln(N/N_0)}{\Delta t} \quad (\text{Equação 2})$$

Para determinar k_u , os valores utilizados foram:

N (população urbana em 2010)= 160.925.792 habitantes (IBGE, Censo 2010);
 N_0 (população em 2000)= 137.953.959 habitantes (IBGE, Censo 2000);
 $\Delta t = 20$ anos.

Dessa forma, k_u é igual a 0,0154. A população de 2011 foi encontrada com os valores iniciais correspondente ao ano de 2010 e com o k_u determinado anteriormente, nesse caso o Δt foi de um ano. Para a população de 2012 os valores iniciais foram os dados de 2011, com o mesmo valor de k_u encontrado e o Δt de um ano. Esse processo se repetiu até o ano de 2030.

4.4.2 Método das componentes demográficas

O método das componentes demográficas é utilizado pelo IBGE para o cálculo das projeções da população total no Brasil. O IBGE já realizou essa projeção até o ano de 2060, portanto abrange o período de interesse deste estudo. No entanto, as projeções são para a população total. Por este motivo, estabeleceu-se a porção da população total que reside em área urbana baseado nos dados do censo de 2010, P_u (P_u =População urbana/população total). E essa razão foi multiplicada para as populações projetadas a partir do método das componentes demográficas resultando nas projeções da população urbana.

Para calcular o total de resíduo sólido gerado em um ano multiplica-se a taxa de geração do resíduo sólido urbano (kg/capita/dia) pela população urbana desse ano (**Tabela 3**).

Tabela 3 - fórmula do total de RSU gerado

Total de resíduo sólido gerado (ton/ano)	=	Taxa de geração de resíduo sólido urbano per capita	*	População urbana do ano correspondente
--	---	---	---	--

Fonte: Forecasting Solid Waste Generation Rates, 2017.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Espaciais (ABRELPE) divulgou em seus panoramas anuais as taxas de geração per capita de RSU do ano de 2008 a 2015 (**Tabela 4**), logo, para poder estimar o RSU gerado de 2010 a 2030 estabeleceu-se dois cenários.

Tabela 4 - Geração per capita

Ano	Geração per capita (kg/hab/dia)
2008	0,923
2009	0,985
2010	1,037
2011	1,045
2012	1,05
2013	1,041
2014	1,062
2015	1,071

Fonte: ABRELPE

No primeiro cenário estabeleceu a geração per capita como sendo o valor médio, 1,02675 kg/hab/dia, dos anos de 2008 a 2015. Para o segundo cenário foi realizado uma adequação aos valores fornecidos pela ABRELPE, escolhendo a equação que apresentasse o maior R² (0,9863). Até o ano de 2020 a equação foi capaz de descrever de forma razoável os resultados, a partir desse ano realizou-se o congelamento da taxa de geração per capita até o ano final da análise (**Tabela 5**).

Tabela 5 - Geração per capita (ABELPE)

Ano	Geração per capita (kg/hab/dia)
2008	0,923
2009	0,985
2010	1,037
2011	1,045
2012	1,05
2013	1,041
2014	1,062
2015	1,071
2016	1,117
2017	1,192
2018	1,31
2019	1,479
2020	1,709

Fonte: elaborada pela autora

Portanto, através desses métodos foi possível obter o RSU gerado nos anos de 2010 a 2030 e o acumulado nesse período. O RSU acumulado previsto é importante para possibilitar o dimensionamento do aterro sanitário, que será descrito no próximo item.

4.4.3 Cálculo da área para aterro sanitário

Como mencionado na **Tabela 1**, o mínimo determinado pela ABNT como vida útil de um aterro é de 10 anos, porém, no Brasil o mais comum é encontrarmos aterros com vida útil de 20 anos, que é valor utilizado no presente projeto e que também foi utilizado por Curty, (2005).

Para o dimensionamento, os dados e parâmetros de projeto, bem como as formulas finais estão contidos na **Tabela 6** a seguir.

Tabela 6 - Dados e parâmetros de projeto

Dados de Projeto	Parâmetros de Projeto
M_r = Média diária de resíduo [t/dia]	Disposição do resíduo:
δ = Massa específica [t/m ³]	Camada de resíduo = 70%
R_v = Redução volumétrica = 1/4	Camada de cobertura = 30%
Fração do número de camadas	
H_r = Altura da camada de resíduo = 3,5m	
H_c = Altura da camada de cobertura = 1,5m	
H_t = Altura total da célula = $H_r + H_c$ = 5m	
Porcentagem de ocupação do resíduo compactado (Prc):	
$Prc = \frac{100\% * H_r}{H_t} = 70\%$	
Volume de resíduo na descarga (Vrd):	
$Vrd = \frac{M_r}{\delta} = \frac{m^3}{dia}$	
Volume de resíduo compactado (Vrc):	
$Vrc = Vrd * R_v = \frac{m^3}{dia}$	
Volume diário do aterro (Vt):	
$Vt = \frac{100\% * Vrc}{70\%} = m^3 / dia$	
Área do aterro (A):	
$A = \frac{Vt}{H} = \frac{m^2}{dia}$	
Área total do aterro (At):	
$At = \frac{Vt * 365 dias * 20 anos}{H_t} = m^2$	
Área final do aterro (Af):	
$Af = At * 1,2$	

Fonte: Curty, 2005.

Para se estimar a área total de um aterro sanitário, além da área necessária para o depósito dos RSU deve-se acrescentar uma área correspondente a 20% da área calculada, pois em um aterro sanitário necessita de edificações auxiliares e de apoio, como, guarita, uma balança rodoviária, prédio de administração e um galpão de manutenção e oficina coberta.

Por fim, a massa específica pode ser obtida a partir da multiplicação do peso específico pela aceleração da gravidade da Terra. Para determinar a massa específica a ser utilizada foi feito um levantamento dos valores de massas específicas adotados em artigos com propostas semelhantes (**Tabela 7**) e convencionou-se a massa específica o valor médio dos valores encontrados, 0,703 t/m³.

Tabela 7 - Massas específicas de resíduos

REFERÊNCIA	ESTADO	MASSA ESPECÍFICA (t/m ³)
Edimar Batista Curty, (2005)	RJ	0,8
Karine Trajano da Silva, (2016)	RJ	0,6
Cícero Antonio Antune Catapreta, (2008)	MG	0,71-1,12
Guilherme Boaventura Oliveira, (2008)	SP	0,5
Marcelo Orsatti Landi, (2013)	SP	0,7

Fonte: elaborada pela autora

4.5 MODELO DE GERAÇÃO DE RSU PARA MUNICÍPIOS PAULISTAS

A fim de se obter resultados mais precisos e específicos, os cálculos de dimensionamento dos aterros foram aplicados para os 645 municípios do estado de São Paulo, porém, com as alterações necessárias.

4.5.1 Estimativa populacional até 2037

A estimativa populacional foi realizada apenas pelo método do crescimento exponencial, uma vez que a nível municipal não existem dados disponíveis suficientes para realizar o método das componentes demográficas (IBGE).

Assim como no **item 4.4.1**, a Equação 1 descreve o crescimento exponencial:

$$N = N_0 * \exp(k * \Delta t) \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo,

N :população no tempo t (habitantes);

N_0 : população no tempo 0 (habitantes);

k : taxa exponencial anual de crescimento (1/ano);

Δt : tempo $t - t(0)$ (anos).

A Equação 2, obtida a partir da Equação 1, fornece a taxa exponencial de crescimento total ou a taxa de crescimento urbano da população, k_u :

$$k_u/k_t = \frac{\ln(N/N_0)}{\Delta t} \quad (\text{Equação 2})$$

Neste caso, o k_t (referente à população total) de cada município foi encontrado a partir dos dados populacionais para cada município dos censos do IBGE de 2000 e 2010 e em seguida, foi encontrada a população total (N) de cada município, a partir da equação 1, para os próximos 27 anos.

Considerou-se então que a porcentagem da população urbana que residia em cada município em 2010 iria se manter para os próximos anos da projeção e a mesma também é fornecida pelo IBGE. Portanto, para encontrar a população urbana estimada de cada município, aplicou-se a porcentagem citada anteriormente em cima dos valores obtidos da população total para cada município.

4.5.2 Taxa de geração de RSU

Para realizar a taxa de geração de RSU o estudo foi dividido novamente em dois cenários, descritos a seguir:

- Cenário 1: Dados fornecidos pela Agência Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL EM 2010, 2011, 2012, 2013, 2013 e 2015**
- Cenário 2: Dados fornecidos pela CETESB – **INVENTÁRIO ESTADUAL DE RESÍDUOS SOLIDOS URANOS DE 2012, 2013, 2014 e 2015**

4.5.2.1 Cenário 1

A ABRELPE disponibiliza em seus panoramas os estudos referentes aos estados brasileiros. Portanto, a taxa de geração de RSU do estado de São Paulo somada ao seu respectivo crescimento em cada ano, foi aplicada para todos os municípios em questão.

Primeiramente, quantidade de gerada de RSU em (toneladas/dia) foi transformada em (kg/dia) e depois dividida pela população total do estado em seu respectivo ano, resultando em uma taxa de geração de RSU em (kg/hab/dia).

Na sequência foi feita a média referente aos anos de 2010 e 2015 e o resultado foi aplicado diretamente no ano de 2017 e também foi calculado o crescimento dessa taxa de um ano para o outro.

Os resultados negativos, que significariam uma redução dessa taxa, foram substituídos pela porcentagem imediatamente anterior, como pode ser observado nas **Tabelas 8 e 9** a seguir.

Tabela 8 - RSU gerado (ABRELPE)

Ano	População	RSU gerado (t/dia)	RSU gerado (kg/dia)	(kg/hab/dia)
2010	39.552.234	55742	55742000	1,409
2011	39.874.768	56007	56007000	1,405
2012	40.177.103	56626	56626000	1,409
2013	43.663.669	59291	59291000	1,358
2014	44.035.304	61344	61344000	1,393
2015	44.396.484	62156	62156000	1,400
			Média	1,396

Fonte: elaborada pela autora

Tabela 9 - Taxa de crescimento da geração per capita

Ano	Ano/ano	1-ano	Resultados finais	%
2010-2011	0,9966269	0,003373083	0,003373083	0,34
2011-2012	1,003444	-0,003443964	0,003373083	0,34
2012-2013	0,9634547	0,036545337	0,003373083	0,34
2013-2014	1,0258941	-0,025894126	0,003373083	0,34
2014-2015	1,0049938	-0,004993814	0,003373083	0,34

Fonte: elaborada pela autora

Por fim, a partir do ano de 2017, foi acrescentado 0,34% no valor de cada taxa de geração de RSU, até o ano de 2037 (**Tabela 10**).

Tabela 10 - Resultados das taxas de geração per capita para cada ano

Geração per capita de resíduo com crescimento exponencial aplicado (kg/hab/dia)				
2017	2018	2019	2020	2021
1,396	1,401	1,406	1,410	1,415
2022	2023	2024	2025	2026
1,420	1,425	1,430	1,434	1,439
2027	2028	2029	2030	2031
1,444	1,449	1,454	1,459	1,464
2032	2033	2034	2035	2036
1,469	1,474	1,479	1,484	1,489
2037				
1,494				

Fonte: elaborada pela autora

4.5.2.2 Cenário 2

Neste caso trabalhamos direto com a quantidade de RSU gerada por município, em (ton/dia). A CETESB disponibiliza em seus inventários estaduais essa característica específica de cada um dos 645 municípios do estado de São Paulo, portanto, foi realizado o cálculo de crescimento dessa quantidade de geração de um ano para outro.

Os resultados de 2012 fogem dos padrões encontrados nos anos de 2013, 2014 e 2015, sendo assim, foi feita uma média apenas com duas taxas de crescimento (2013/2014 e 2014/2015) para cada município, as quais foram aplicadas de ano em ano até 2037. Neste caso, para calcular as médias, também foram encontradas taxas de crescimento negativas, as quais foram consideradas nulas para realizar os cálculos.

Por fim, cada município, desde 2017 até 2037, obteve sua própria quantidade de geração de RSU com seu respectivo crescimento.

4.6 CÁLCULO DAS ÁREAS PARA ATERROS SANITÁRIOS

4.6.1 Massa específica

Segundo Silveira, 2014, em aterros com altos teores de matéria orgânica, os pesos específicos normalmente são baixos, entre 5 a 7 kN/m³. Já no caso de resíduos pouco compactados, e é da ordem de 9 a 13 kN/m³, quando se utiliza compactação controlada.

Ao tomar como base a referência acima, foi feita uma média entre 0,5 t/m³ e 0,7 t/m³, e foi utilizado o resultado de 0,6 t/m³ para a massa específica do RSU em ambos os cenários.

4.6.2 Cenário 1

Neste caso, o primeiro passo é encontrar o total de resíduo gerado por cada município, para isso, foi multiplicada a taxa de geração de RSU (kg/hab/dia)

pela população urbana de cada município, e por 10^{-3} afim de transformar as unidades (**Equação 3**).

$$\text{Total de resíduo (t/dia)} = \text{tx. geração RSU (kg/hab/dia)} * \text{população urbana} * 10^{-3}$$

(Equação 3)

Em seguida, foram aplicadas todas as fórmulas previamente demonstradas no **item 3.3** para o dimensionamento dos aterros, só que neste caso, para cada município do estado de São Paulo, entre os anos de 2017 e 2017.

4.6.3 Cenário 2

A quantidade de RSU gerada para cada município já havia sido encontrada conforme o item 2.2.2, sendo assim, foram aplicadas todas as fórmulas previamente demonstradas no item 3.3 para o dimensionamento dos aterros, só que neste caso, para cada município do estado de São Paulo, entre os anos de 2017 e 2017.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RSU PARA O BRASIL

O cenário 1 foi realizado a partir das médias das taxas de geração per capita disponibilizadas pela ABRELPE até o ano de 2015. E no cenário 2, realizou-se uma projeção estatística de crescimento dessa taxa em função do passar dos anos.

5.1.1 Cenário 1

Tabela 11 - Cenário 1 - Projeção da população a partir da população de 2010 e do RSU gerado, considerando um crescimento exponencial e o método das componentes demográficas

	CRESCIMENTO EXPONENCIAL		MÉTODO DAS COMPONENTES DEMOGRÁFICAS	
	POPULAÇÃO URBANA	RSU GERADO (t/ano)	POPULAÇÃO URBANA	RSU GERADO (t/ano)
2010	160.925.792	60.894.320	195.497.797	73.976.366
2011	163.423.612	62.362.450	197.397.018	75.326.702
2012	165.960.201	63.595.949	199.242.462	76.349.711
2013	168.536.163	64.037.843	201.032.714	76.385.395
2014	171.152.107	66.343.691	202.768.562	78.599.178
2015	173.808.655	67.944.410	204.450.649	79.922.825
2016	176.506.437	66.148.214	206.081.432	77.231.850
2017	179.246.092	67.174.938	207.660.929	77.823.788
2018	182.028.271	68.217.598	209.186.802	78.395.630
2019	184.853.634	69.276.441	210.659.013	78.947.362
2020	187.722.851	70.351.720	212.077.375	79.478.912
2021	190.636.603	71.443.688	213.440.458	79.989.746
2022	193.595.581	72.552.606	214.747.509	80.479.582
2023	196.600.486	73.678.736	215.998.724	80.948.492
2024	199.652.033	74.822.345	217.193.093	81.396.098
2025	202.750.944	75.983.704	218.330.014	81.822.175
2027	209.093.813	78.360.782	220.428.030	82.608.435
2028	212.339.276	79.577.063	221.388.185	82.968.266
2029	215.635.113	80.812.223	222.288.169	83.305.548
2030	218.982.106	82.066.555	223.126.917	83.619.880
2050	297.983.078	111.673.256	226.347.688	84.826.908
2070	405.484.797	151.961.003	256.646.260	96.181.715
2100	643.648.908	241.216.278	284.332.211	106.557.406

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 12 - Total acumulado em relação à tabela 11

RESÍDUO SÓLIDO URBANO GERADO DE 2010 A 2030	
CRESCIMENTO EXPONENCIAL	MÉTODO DAS COMPONENTES DEMOGRÁFICAS
1.492.808.366 t/ano	1.671.802.315 t/ano

Fonte: Elaborado pela autora

Neste cenário, o valor médio utilizado foi de 1,02675 kg/hab/dia, abrangendo os valores dos anos de 2008 a 2015. Após realizar a multiplicação da população total urbana de cada ano pela taxa de geração per capita com suas

devidas transformações de unidades, obteve-se o total gerado por ano e o total acumulado entre 2010 e 2030, como mostram os resultados da **Tabela 11 e 12**.

5.1.2 Cenário 2

No cenário 2, foi necessária a realização do cálculo de novas taxas de geração per capita, as quais foram submetidas a uma equação estatística que fornece o seu comportamento linear, e então foi possível realizar as projeções futuras. Para ilustrar esse resultado, segue a Figura 3:

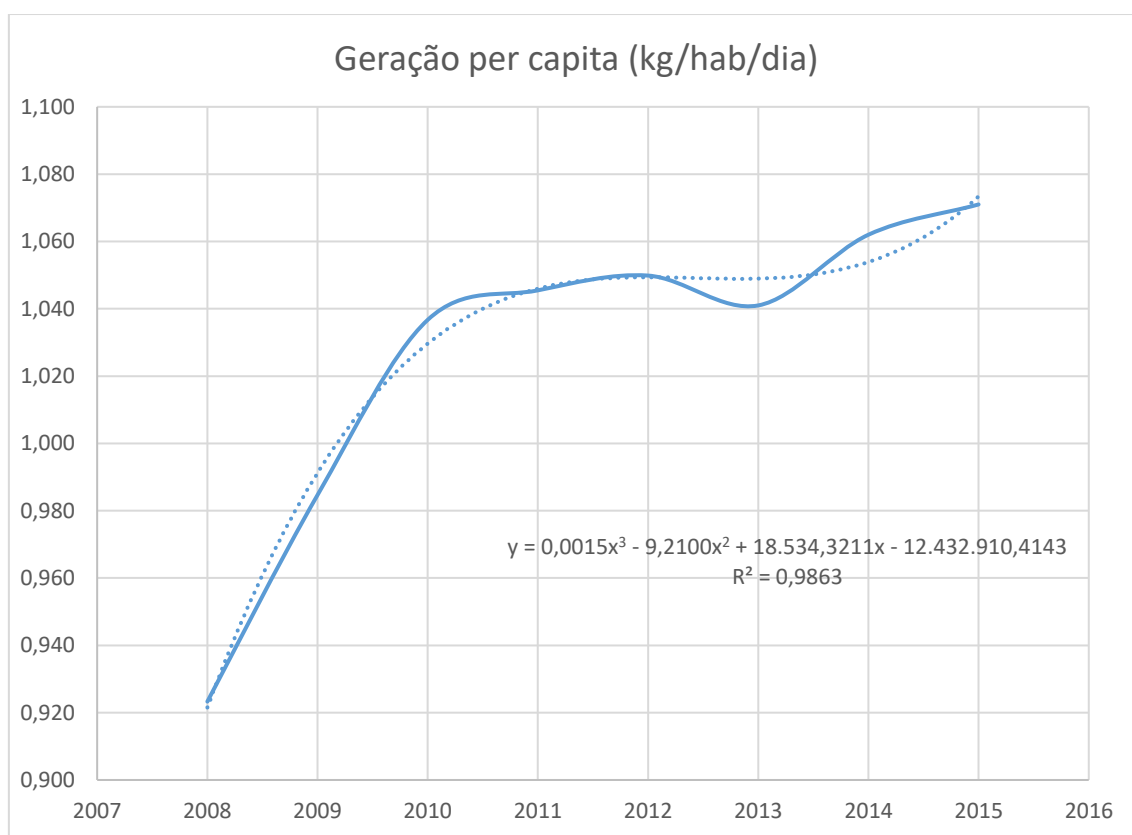


Figura 3 - Comportamento das taxas de geração per capita fornecidas pela ABRELPE

Fonte: elaborado pela autora

Em seguida, realizou-se também a multiplicação da população total urbana de cada ano pela taxa de geração per capita com suas devidas transformações de unidades e obteve-se os seguintes resultados (**Tabelas 13 e 14**).

Tabela 13 - Projeção da população a partir da população de 2010 e do RSU gerado, considerando um crescimento exponencial e o método das componentes demográficas

	CRESCIMENTO EXPONENCIAL		MÉTODO DAS COMPONENTES DEMOGRÁFICAS	
	POPULAÇÃO URBANA	RSU GERADO (t/dia)	POPULAÇÃO URBANA	RSU GERADO (t/dia)
2010	160.925.792	60.894.320	195.497.797	73.976.366
2011	163.423.612	62.362.450	197.397.018	75.326.702
2012	165.960.201	63.595.949	199.242.462	76.349.711
2013	168.536.163	64.037.843	201.032.714	76.385.395
2014	171.152.107	66.343.691	202.768.562	78.599.178
2015	173.808.655	67.944.410	204.450.649	79.922.825
2016	176.506.437	71.931.158	206.081.432	83.983.771
2017	179.246.092	78.016.493	207.660.929	90.383.992
2018	182.028.271	87.061.993	209.186.802	100.051.600
2019	184.853.634	99.818.946	210.659.013	113.753.569
2020	187.722.851	117.081.095	212.077.375	132.270.797
2021	190.636.603	139.686.227	213.440.458	156.395.424
2022	193.595.581	168.517.819	214.747.509	186.929.793
2023	196.600.486	204.506.728	215.998.724	224.685.062
2024	199.652.033	248.632.937	217.193.093	270.477.369
2025	202.750.944	301.927.346	218.330.014	325.126.977
2026	205.897.955	365.473.628	219.408.552	389.455.250
2027	209.093.813	440.410.135	220.428.030	464.283.170
2028	212.339.276	527.931.854	221.388.185	550.429.847
2029	215.635.113	629.292.435	222.288.169	648.708.188
2030	218.982.106	745.806.269	223.126.917	759.922.609

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 14 - Total acumulado em relação à tabela 13

RESÍDUO SÓLIDO URBANO GERADO DE 2010 A 2030	
CRESCIMENTO EXPONENCIAL	MÉTODO DAS COMPONENTES DEMOGRÁFICAS
4.611.273.727 t/dia	4.957.417.595 t/dia

Fonte: Elaborado pela autora

5.2 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

É importante frisar que, tanto para o primeiro cenário quanto para o segundo cenário, as populações foram projetadas a partir da população de 2010 e para o cálculo do RSU gerado utilizou-se até o ano de 2015 taxas de geração per capita fornecidas pela ABRELPE.

A partir da **Figura 4** pode-se inferir que o crescimento populacional descrito pelo método das componentes demográfica é mais suave, ou seja, ao se considerar um crescimento exponencial da população há um aumento maior de indivíduos em um mesmo intervalo de tempo.

Na **Figura 5** observa-se que as curvas referentes ao cenário 1 se assemelham, assim como as curvas do cenário 2, porém para o mesmo método em diferentes cenários há diferenças significativas nas curvas. Em vista disso, pode-se considerar que os cenários foram mais determinantes que os métodos para a projeção da geração do resíduo.

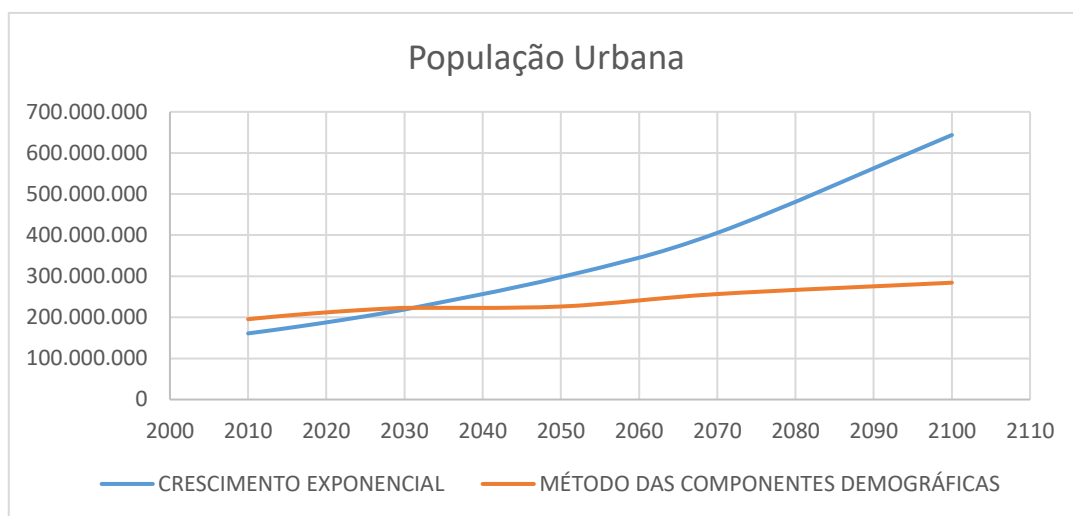


Figura 4 - Curvas de crescimento da população urbana
Fonte: elaborado pela autora

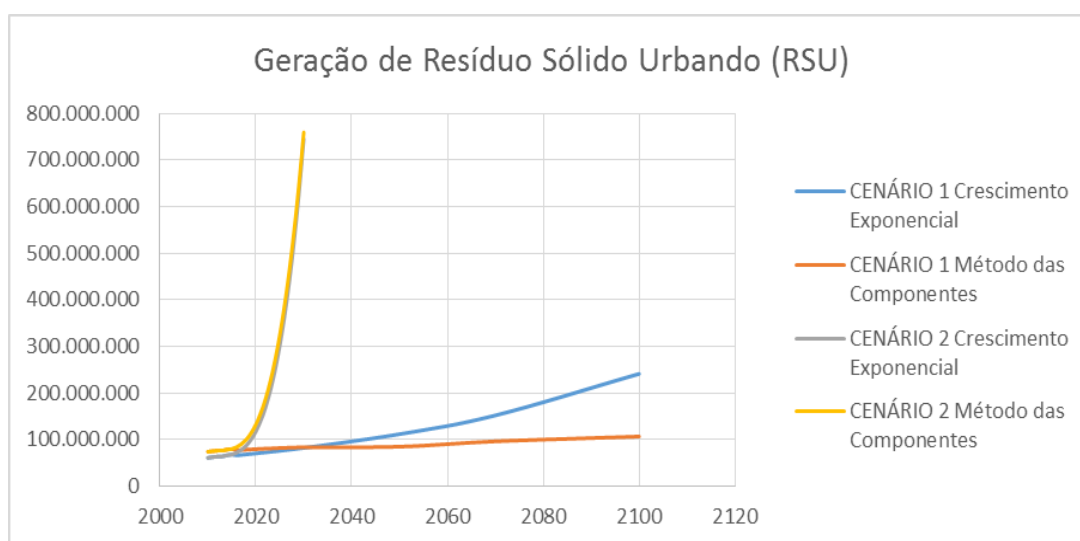


Figura 5 - Comparação dos diferentes métodos nos diferentes cenários propostos

Fonte: elaborado pela autora

5.3 ESTIMATIVA DA ÁREA DE ATERRO SANITÁRIO PARA O BRASIL

Após os cálculos para os dimensionamentos das áreas de aterro sanitário necessárias para dispor o resíduo sólido urbano gerado no Brasil com os diferentes cenários e métodos previamente apresentados, obteve-se os seguintes resultados separados por períodos (2010 a 2020, 2020 a 2030 e 2010 a 2030) (**Tabela 15 e Tabela 16**):

Tabela 15 - Área (km²) necessária para aterrar RSU do Brasil dos períodos indicados, e considerando o cenário 1.

		2010-2020	2020-2030	2010-2030
Cenário 1	Crescimento exponencial	354,24	408,12	728,05
	Componentes demográficas	415,74	438,37	815,35

Fonte: elaborado pela autora

Tabela 16 - Área (km²) necessária para aterrar o RSU do Brasil dos períodos indicados, e considerando o cenário 2.

		2010-2020	2020-2030	2010-2030
Cenário 2	Crescimento exponencial	409,23	1.896,82	2.248,94
	Componentes demográficas	478,44	2.003,83	2.417,76

Fonte: elaborado pela autora

Para todos os períodos, no cenário 1 (**Tabela 15**), a estimativa da área dos aterros sanitários é maior de acordo com o método das componentes demográficas. Analisando o período de 2010 a 2030 o crescimento exponencial necessitará de 728,05 km², ou seja, o equivalente a 3.901 (três mil e novecentos e um) estádios do maracanã (RJ), enquanto que de acordo com o método das componentes demográficas será preciso 468 (quatrocentos e sessenta e oito) maracanãs a mais que o primeiro método.

No cenário 2 (**Tabela 16**), já é possível notar uma diferença de área maior entre o período de 2010 a 2020 e 2020 a 2030 não constatada no cenário 1 em ambos os métodos. No período total, de 2010 a 2030, o cenário 2 necessitaria de um aterro com área muito superior à do cenário 1 (**Figura 6**), a ponto de precisar de mais de 12.000 (doze mil) maracanãs.

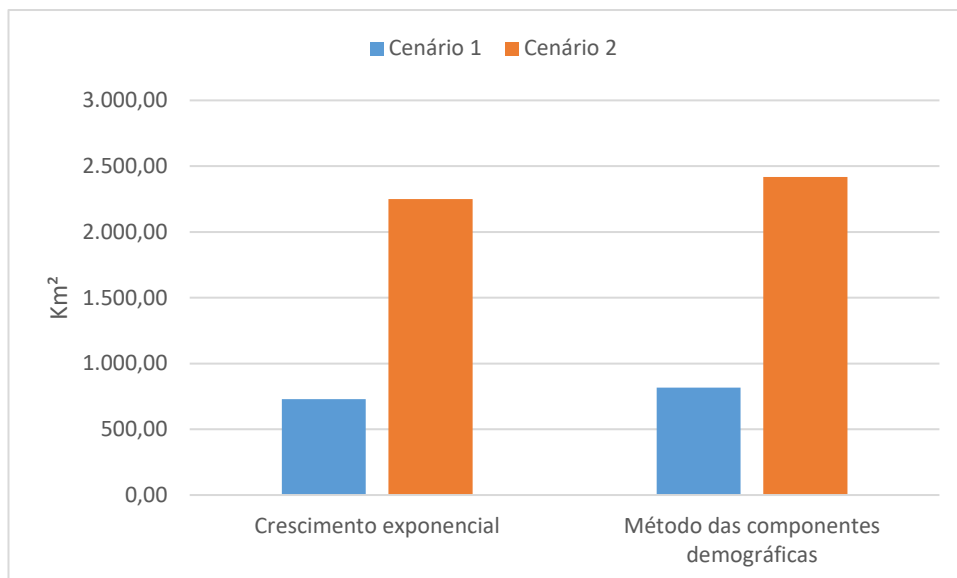


Figura 6 - Áreas necessárias para se dispor os RSU em aterro sanitário no Brasil no período de 2010 a 2030

Fonte: elaborado pela autora

5.4 ESTIMATIVAS REFERENTES AOS MUNICÍPIOS PAULISTAS

Os mapas e as tabelas contidos na discussão dos cenários a seguir, demonstram os resultados do dimensionamento dos aterros de cada município do estado de São Paulo segundo o cenário 1 (ABRELPE) e o cenário 2 (CETESB).

As tabelas contêm todos os municípios que apresentaram uma área de aterro maior ou igual a 0,1 km². Isso porque, os mapas foram divididos em quatro classes distintas (**Tabela 17**) e os municípios que não foram destacados, se enquadram na primeira classe.

Tabela 17 - Divisão de classes dos mapas

Categorias	Classes (Km²)
Muito Pequena	0,0 - 0,1
Pequena	0,1 - 0,5
Média	0,5 - 1,0
Grande	Acima de 1,0

Fonte: elaborado pela autora

5.4.1 Cenário 1

No presente cenário, deve-se considerar que a mesma taxa de geração de resíduos sólidos foi utilizada para todos os municípios, taxa essa que é um resultado referente ao estado de São Paulo como um todo e são disponibilizadas pela ABRELPE.

Sendo assim, esse cenário pode ser considerado menos preciso, pois, na realidade, os municípios apresentam diferentes taxas de geração de RSU, as quais estão diretamente relacionadas ao número da população urbana de cada um deles em determinado ano, ou seja, os municípios que apresentam uma população urbana pequena, tendem a ter uma menor geração de RSU.

Outro fator que deve ser considerado é o crescimento da taxa de geração de resíduos durante os 20 anos. A mesma taxa de crescimento foi aplicada na taxa de geração de RSU e para muitos municípios essa taxa de crescimento não é considerada uma verdade. Cada município tem a sua geração de RSU anual baseada nas suas atividades econômicas e sociais, e no número da população urbana referente ao ano em questão, portanto, a taxa de crescimento da quantidade de RSU que é gerada pode variar.

Tabela 18 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km² - 2017

Municípios (2017)	Área do aterro (km²)
São Vicente	0,102951
Bauru	0,104709
Itaquaquecetuba	0,105175
Piracicaba	0,111135
Carapicuíba	0,113183
Jundiaí	0,113408
Mogi das Cruzes	0,116298
Diadema	0,118711
São José do Rio Preto	0,122348
Santos	0,122490
Mauá	0,133846
Osasco	0,196932
Ribeirão Preto	0,199423
Santo André	0,201392
S. Bernardo do Campo	0,232432
Campinas	0,333870
Guarulhos	0,389976
São Paulo	3,413,354

Fonte: elaborado pela autora

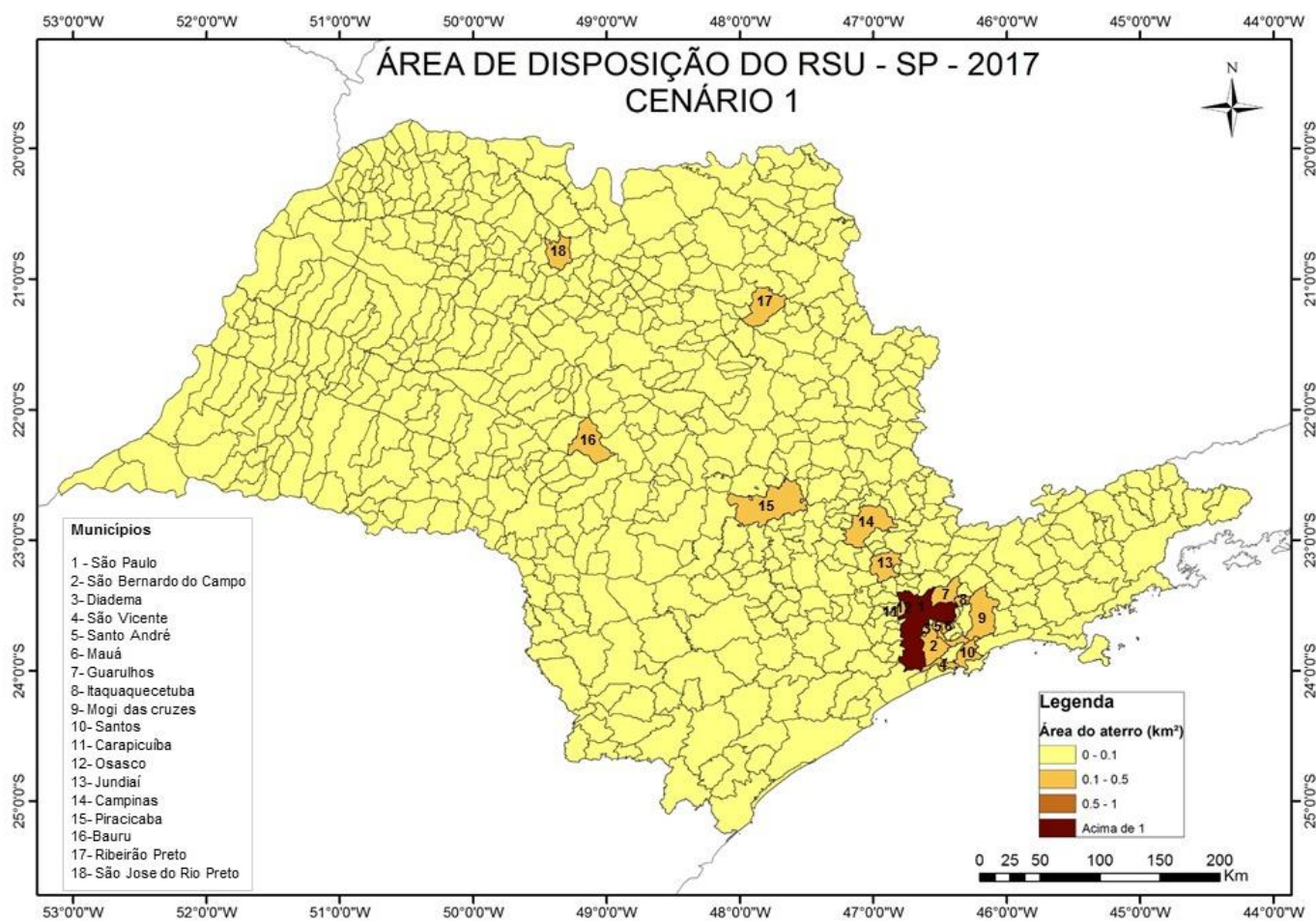


Figura 7 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2017 – dados estaduais ABRELPE

Fonte: elaborado pela autora

Tabela 19 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km² - 2037

Municípios (2037)	Área do aterro (km²)
Limeira	0,110137
Embu	0,110556
Barueri	0,110773
Itapevi	0,111076
Hortolândia	0,11187
Guarujá	0,116372
Taubaté	0,121493
Franca	0,128677
Sumaré	0,129256
São Vicente	0,132139
Santos	0,132209
Bauru	0,132779
Taboão da Serra	0,135771
Carapicuíba	0,139583
Cotia	0,140647
Piracicaba	0,146152
Diadema	0,148506
Itaquaquecetuba	0,15652
Jundiaí	0,159092
São José do Rio Preto	0,169937
Mogi das Cruzes	0,171141
Praia Grande	0,181649
Mauá	0,188884
Osasco	0,219823
Santo André	0,232167
São Bernardo do Campo	0,294579
Ribeirão Preto	0,306535
Campinas	0,444331
Guarulhos	0,541932
São Paulo	4,242393

Fonte: elaborado pela autora

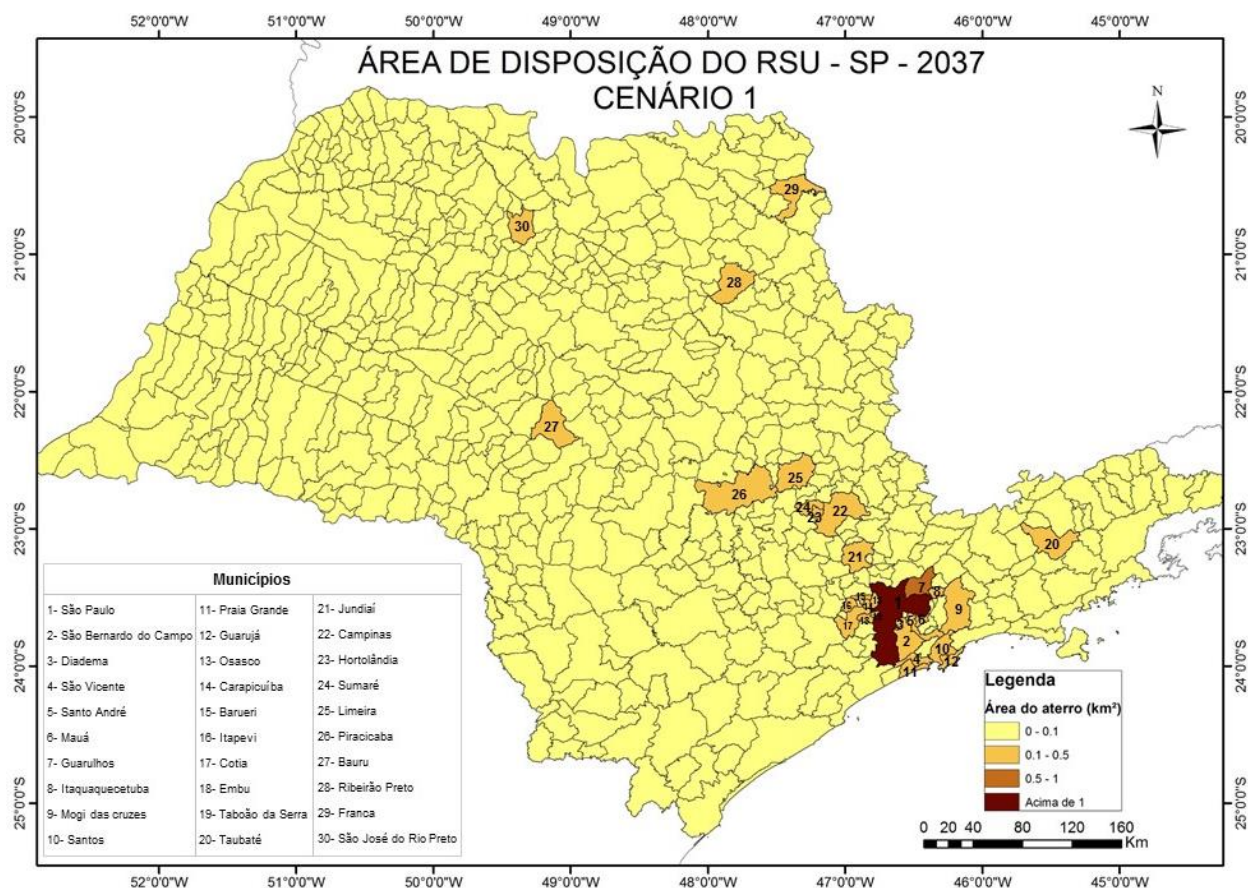


Figura 8 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2037 – dados estaduais ABRELPE

Fonte: elaborado pela autora

5.4.2 Cenário 2

Neste segundo caso, não foi necessário o cálculo de uma taxa de geração de resíduos, pois os dados da CETESB já disponibilizaram a quantidade de RSU gerada por cada município, sendo assim, foram obtidos resultados distintos em relação ao cenário anterior.

Ao levar em conta que os dados aqui utilizados se aproximam muito mais da realidade de cada município, uma vez que tínhamos as informações características de cada região para a realização dos cálculos, podemos afirmar que este é um cenário mais preciso em relação ao cenário 1.

Ademais, deve-se considerar que a única metodologia aplicada neste caso referente à aproximações, foi o cálculo da estimativa de crescimento da geração de RSU para os anos futuros com base nas gerações dos anos anteriores.

Sendo assim, seguem os resultados obtidos para os anos de 2017 e 2037 nas tabelas 16 e 17 e nas figuras 9 e 10, e nota-se também que os resultados foram mais restritos em relação ao cenário 1.

Tabela 20 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km² - 2017

Município	Área do aterro (km ²)
Sorocaba	0,150063
Ribeirão Preto	0,156327
São José dos Campos	0,158259
Osasco	0,160151
Santo André	0,164163
São Bernardo do Campo	0,186795
Campinas	0,266859
Guarulhos	0,309859
São Paulo	2,45134

Fonte: elaborado pela autora

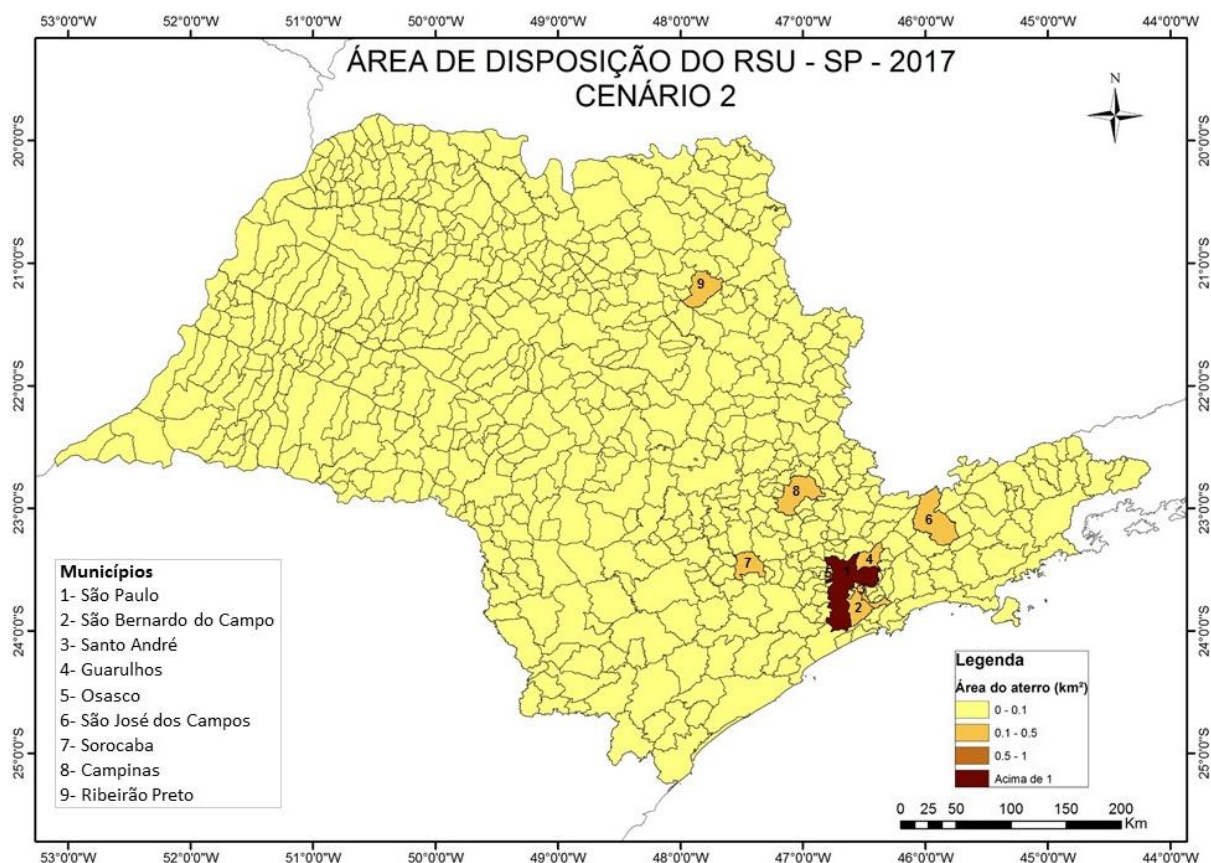


Figura 9 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2017 – dados estaduais CETESB

Fonte: elaborado pela autora

Tabela 21 - Municípios que apresentaram área de aterro maior ou igual a 0,1 km² - 2037

Município	Área do aterro (km ²)
Mauá	0,106259
Osasco	0,167677
Santo André	0,176882
Sorocaba	0,191389
São José dos Campos	0,197777
Ribeirão Preto	0,201083
São Bernardo do Campo	0,213798
Campinas	0,314821
Guarulhos	0,375734
São Paulo	2,45134

Fonte: elaborado pela autora

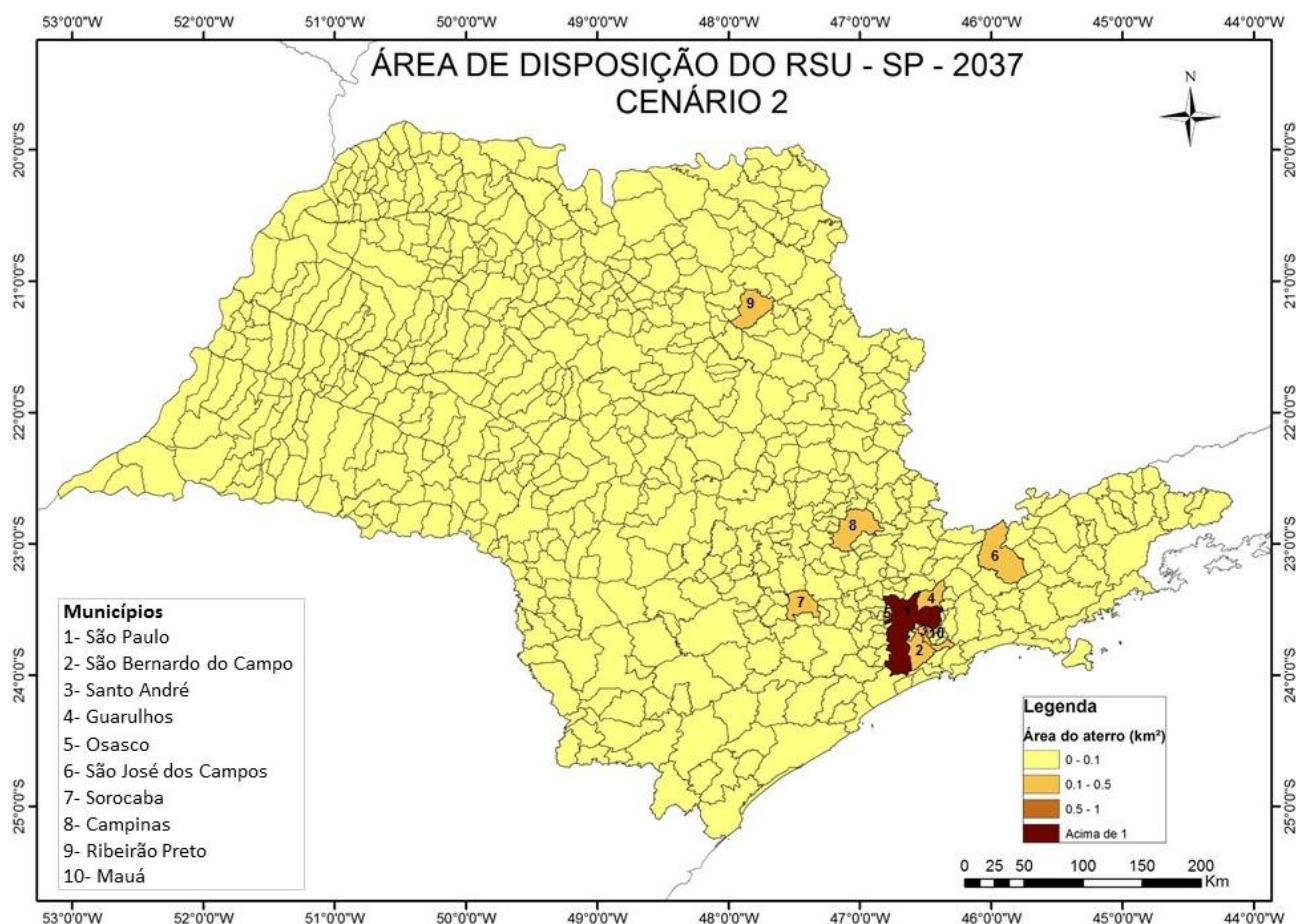


Figura 10 - Resultados de dimensionamento do aterro para o ano de 2037 – dados estaduais CETESB

Fonte: elaborado pela autora

5.4.3 Comparação de resultados

Apesar de os resultados divergirem devido aos diferentes métodos aplicados em cada cenário, podemos encontrar um padrão que se repete em todos os casos, e por isso o mesmo deve ser destacado.

É evidente que a maioria dos municípios encontrados no cenário 2, também se encontram no cenário 1, porém, nota-se que São Paulo, Guarulhos e Campinas são os três municípios que mais geram RSU no estado de São Paulo, ou seja, necessitariam de uma área maior para dispor seus resíduos nos anos futuros, isso para todas as situações simuladas.

Isto posto, foi verificado no plano municipal de resíduos sólidos de cada um dos municípios citados anteriormente quais são os prós e contras encontrados na gestão de RSU nessas regiões.

5.4.3.1 São Paulo

- A administração municipal é responsável direta pela gestão e o manejo dos resíduos urbanos. As regras para o gerenciamento dos resíduos decorrem da Política Nacional de Resíduos Sólidos que estabeleceu princípios e diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de todos os resíduos sólidos.
- No Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (PGIRS) de São Paulo define-se ainda a necessidade de desenvolvimento de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos pelos responsáveis por grandes eventos e feiras que ocorram na cidade, tendo em vista que são atividades comerciais e de prestação de serviços que geram resíduos que, por seu volume, não são equiparados aos resíduos domiciliares.
- Os Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos deverão adotar a diretriz central deste PGIRS, referente ao cumprimento da ordem de prioridade determinada pela PNRS: a não geração, a redução da geração, a reutilização e a reciclagem dos resíduos, visando a sua valorização, e quando não possível, seu tratamento e disposição final adequada.

- Não cabe ao PGIRS a definição de meta para apresentação ou fiscalização dos Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, por já estar isto estabelecido na Política Nacional.

Tendo em visto as informações acima do PGIRS de São Paulo de 2014, pode-se aferir que o plano de gestão de RSU do estado está bem formulado, porém, faltam órgãos específicos o suficiente para colocar em prática as ações e meios de fiscalização que reduzam a quantidade de RSU que vai para a disposição final e também que melhorem o gerenciamento.

5.4.3.2 Guarulhos

- Os serviços de limpeza urbana de Guarulhos são coordenados pela Secretaria de Serviços Públicos através do Departamento de Limpeza Urbana - DELURB. Os sistemas de coleta convencional de resíduos e limpeza urbana são realizados de forma regular e efetiva na maioria da cidade.
- A quantidade de resíduos coletada em Guarulhos tem aumentado ano a ano, tendo ultrapassado as 300 mil toneladas em 2009. Já a geração per capita de resíduos, correspondeu a 700 Gr/hab./dia em 2008 e 750 Gr/hab./dia em 2009.
- A disposição final dos resíduos é realizada em aterro sanitário licenciado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, de propriedade privada, contratado pela Prefeitura de Guarulhos para esta finalidade, desde o final dos anos 90, quando foi encerrado e recuperado o antigo lixão.
- Ressalta-se que, há um grande número de indústrias em Guarulhos, sendo necessário monitoramento do manejo dos resíduos por elas gerados.

De acordo com o PGIRS de Guarulhos, aprovado em 2013, o maior desafio do município é enfrentar a demanda de RSU, vinculada ao crescimento industrial e populacional.

5.4.3.3 Campinas

- Campinas possui características socioeconômicas e culturais de uma grande metrópole, produzindo um volume heterogêneo de resíduos sólidos, de origem variada, em atividades diversas no setor produtivo e no setor de consumo.
- Os resíduos sólidos urbanos gerados na cidade de Campinas são de responsabilidade da municipalidade, através do Departamento de Limpeza Urbana (DLU) da Prefeitura de Campinas.
- Com algumas exceções, o crescimento do PIB do município é diretamente proporcional ao crescimento de resíduos sólidos urbanos domiciliares, uma vez que a fabricação de produtos que representa o PIB indica condições econômicas favoráveis que por sua vez aumenta o poder de compra e a renda das famílias, que ao consumir mais, gera maior quantidade de resíduos sólidos.

Em suma, o PGIRS de Campinas relata que sua gestão é eficiente, porém, o que mais interfere na administração é o fato de que a população vem alcançando maiores patamares financeiros e também, destaca-se a falta da educação ambiental, que ajudaria na disposição adequada do resíduo pelo gerador.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, um dos aspectos mais importantes relacionados à implantação de aterros sanitários refere-se à ocupação contínua da área em questão, fato este que é usado inúmeras vezes como justificativa para a escolha de outros tipos de sistemas de tratamento e disposição de resíduos sólidos urbanos. Porém, no Brasil, o custo do terreno e demais custos de investimento são relativamente pequenos quando comparados aos custos de implantação e operação.

Consequentemente, os responsáveis pela gestão de resíduos tanto a nível federal, quanto a nível municipal, optam por terceirizar o serviço de disposição

final de RSU, dando assim, sustento aos aterros particulares, os quais priorizam o atendimento em relação ao melhor custo-benefício para suas empresas.

Além disso, grande parte do país ainda não possui coleta seletiva e até mesmo saneamento básico, o que inviabiliza que o resíduo sólido urbano gerado seja encaminhado para a disposição final ambientalmente adequada.

Outro fator que merece destaque, é a precária educação ambiental no Brasil, afinal, o passo inicial para que todo o trabalho de gestão seja realizado, parte do gerador, que muitas vezes não separa os recicláveis dos orgânicos e não conhece os pontos de coleta e demais mecanismos que podem auxiliá-los quanto ao descarte.

Por fim, é evidente que a área de gestão de resíduos sólidos necessita de muito estudo e grandes investimentos, por isso, a continuidade do presente trabalho é de suma importância, e a intenção é realizar as próximas etapas previamente propostas, a fim de elaborar um modelo espacial de geração de RSU por setor censitário do IBGE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, Alexandre Murilo G; Junior, Paulo Roberto Gonçalo; Kimura, Wagner; Tada, Agnes Massumi; **Armazenamento de lixo urbano em Lixões e Aterros Sanitários: Contaminação do solo, proliferação de macro e micro vetores e contaminação do lençol freático**. EACH-USP. Sociedade, Meio Ambiente e Cidadania. São Paulo, 2009.

Andade, Rafael Medeiros; Ferreira, João Alberto. **A gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil frente às questões da globalização**. REDE – Revista Eletrônica do Prodepa, Fortaleza, v. 6, n.1, p. 7-22, mar-2011.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. ABRELPE. São Paulo. 2008/2009/2010/2011/2012/2013/2014/2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, NBR 13896. **Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, NBR 8419. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro, 1992.

Baptista, Bráulio dos Santos; Puna, Jaime Filipe Borges. **A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos – perspectiva ambiental e econômico-energética.** Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – Portugal. Quim. Nova, Vol. 31, No. 3, p. 645-654, 2008.

Bardhan, Biswadwip; Goel, Sudha; Hazra, Tumpa; Ranjan, Ved Prakash. **Forecasting Solid Waste Generation Rates.** Springer Science+Business Media Singapore. 2017.

Campos, Heliana Kátia Tavares. **Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil.** Universidade de Brasília (UnB). Eng Sanit Ambient, v.17 n.2, p. 171-180, abr/jun 2012.

Catapreta, Cícero Antonio Antunes. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação. Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos.** Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte. 2008.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Definição de Aterro Sanitário.** Disponível em <http://biogas.cetesb.sp.gov.br/aterro-sanitario/>. Acesso em: 14/07/2017.

Curty, Edimar Batista. **Escolha de uma área para disposição final dos resíduos sólidos urbanos e dimensionamento de um aterro sanitário para a cidade de Campos dos Goytacazes/RJ.** UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF. Campo dos Goytacazes. Set-2005.

Figueiredo, João Alcione Sganderla; Godecke Marcos Vinicius; Naime, Roberto Harb;. **Consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil.** Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. Universidade FEEVALE RS, v.8, p.1700-1712, dez-2012.

Governo do Estado de São Paulo, Prefeitura do Meio Ambiente. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo**. Sistema Ambiental Paulista. 2014.

Governo do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos**. Série: Relatórios. São Paulo. 2012/2013/2014/2015.

Governo Federal. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Relatório de pesquisa**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Dimensão ambiental - Saneamento** Indicadores de desenvolvimento sustentável. p. 135-164. Brasil. 2004.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2015**. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS. IBGE. Rio de Janeiro. 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008** IBGE, Rio de Janeiro, 2000.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação - Brasil - Grandes Regiões**. Rio De Janeiro. Resultados universo. Censo Demográfico 2000 e 2010.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Projeções da população: Brasil e Unidades Federativas**. Série: relatórios metodológicos. IBGE. Rio de Janeiro. 2013.

Landi, Marcelo Orsatti. **Análise e simulação de modelos matemáticos para a estimativa de geração de gases em bioprocessos de decomposição anaerobia de resíduos sólidos em aterros sanitários**. Graduação em Engenharia Ambiental. UNESP. Rio Claro. 2013.

Lima, Luiz Mario Queiroz. **Lixo: Tratamento e Bioremediação**. 3 ed revisada e ampliada. Hemus Livraria, Distribuidora e Editora. Brasil. 2004.

Mancini, Sandro Donnini. **Dimensionamento de Aterros Sanitários**. Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Manejo de Resíduos Sólidos. UNESP. Sorocaba. 2016

Mesa da Câmara dos Deputados. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2ed. Série Legislação. Brasília, 2012.

Oliveira, Guilherme Boaventura. **Mapeamento de áreas susceptíveis para implantação de aterro sanitário no município de Rio Claro**. Graduação em Engenharia Ambiental. UNESP. São Paulo. 2008.

Prefeitura Municipal de Campinas. **PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS – PGIRS MUNICÍPIO DE CAMPINAS**. São Paulo, Campinas. 2012.

Prefeitura Municipal de Guarulhos. **PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS – PGIRS MUNICÍPIO DE GUARULHOS**. São Paulo. Guarulhos. 2013.

Prefeitura Municipal de São Paulo. **PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS – PGIRS MUNICÍPIO DE SÃO PAULO**. São Paulo. 2014.

Protasio, Fernando Nóbrega Mendes. **CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO DO ATERRO CONTROLADO DE JARDIM GRAMACHO**. Graduação em Engenharia Ambiental. Departamento de Engenharia Civil. PUC-RJ. Rio De Janeiro. 2013.

Silva, Karine Trajano. **PROJETO DE UM ATERRO SANITÁRIO DE PEQUENO PORTE**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ. 2016.

Silveira, Ana Maria de Miranda. **Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos**. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.