



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA MARIA CARDOSO DE FREITAS GAMA

**ESTUDO DAS EMISSÕES E CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO
ESTUFA NO SETOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA REGIÃO METROPOLITANA
DO RECIFE**

Recife

2020

ANA MARIA CARDOSO DE FREITAS GAMA

**ESTUDO DAS EMISSÕES E CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO
ESTUFA NO SETOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA REGIÃO METROPOLITANA
DO RECIFE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia
Ambiental

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Alessandra Lee Barbosa Firmo

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- G184e Gama, Ana Maria Cardoso de Freitas.
Estudo das emissões e cenários de mitigação de gases de efeito estufa no setor de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife / Ana Maria Cardoso de Freitas Gama – Recife, 2020.
171 f.: figs., quads., tabs., abrev. e siglas, símbolos.
- Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.
Coorientadora: Profa. Dra. Alessandra Lee Barbosa Firmo.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.
Inclui referências e apêndice.
1. Engenharia Civil. 2. Políticas Públicas. 3. Emissões de GEE. 4. NDC Brasileira. 5. CO2 equivalente. 6. Protocolo de Quioto. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Firmo, Alessandra Lee Barbosa (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-192

ANA MARIA CARDOSO DE FREITAS GAMA

**ESTUDO DAS EMISSÕES E CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE GASES
DE EFEITO ESTUFA NO SETOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS
NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Pernambuco como requisito parcial
para obtenção do grau de Doutora em
Engenharia Civil.

Aprovada em: 10/03/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Joácio de Araújo Morais Júnior (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Sérgio Peres Ramos da Silva (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Profa. Dra. Maria de Los Angeles Perez Fernandes Palha (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho ao meu pai, Severino Camelo de Freitas (in memoriam), e a minha mãe, Terezinha Cardoso de Freitas.

AGRADECIMENTOS

Neste momento, que sinto como é importante avançar em mais uma etapa da minha vida, volto o meu olhar para um “Deus” que sempre está presente na minha vida e me coloca em novos desafios e ciclos a fechar, agradeço imensamente pela oportunidade, pedindo-lhe que me permita sonhar sempre e buscar novos horizontes.

E como em tempos atrás, quando estava na elaboração da minha dissertação, percebo que sempre durante o caminhar para consolidar um trabalho como este, passamos por fases de entusiasmo, de desânimo e incertezas quanto a conseguirmos. Em todos esses momentos, precisamos ter força interior e exterior para seguir em frente, só a fé nos movimenta na direção do vencer.

Forças exteriores que buscamos naqueles em que confiamos e que confiam em nós, e a quem temos muito a agradecer. Deixo aqui o meu agradecimento a pessoas queridas, sem as quais não chegaria até aqui.

À minha família, pelo apoio recebido, em especial ao meu esposo Amauri Gama, pelo companheirismo e cumplicidade, e as minhas filhas Ana Tereza, Pollyana e Tatiana, que mesmo de longe estavam sempre a apoiar-me e incentivar-me.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá, que me incentivou a iniciar essa jornada e esteve comigo nesse grande desafio, e em especial a coorientadora Prof^a. Dr^a. Alessandra Lee Barbosa Firmo, que sempre teve a palavra certa na hora necessária, corrigindo e orientando-me.

Ao Centro de Tecnologia e Geociência da Pós-graduação em Engenharia Civil e Grupo de Resíduos pela oportunidade do crescimento pessoal e profissional obtido.

À Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco, hoje Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação, pela oportunidade de transformar o processo de atividade profissional em desenvolvimento de estudos necessários para a construção de uma política pública com base na pesquisa científica.

A todos os Mestres-amigos que nesta jornada repassaram conhecimento e trocamos saberes.

Aos amigos que apoiaram quando, às vezes, a tarefa parecia mais difícil e fomos ajudados, podendo citar, em especial, a Vanessa Costa, menina que esteve comigo ensinando muito sobre crescimento pessoal e profissional, Marcos Edison, a

Graciane Tavares, companheira de pesquisa, Liliana Santos, Jayme Vita, Marco Honorato, Fátima Coeli, entre tantos outros, teria uma lista enorme para citar.

Ao meu cunhado, Jânio Gonçalves, pela revisão e apoio durante esta jornada.

À Caruso Jr., na pessoa de Valéria Moreno Lemos, pelo apoio e elaboração de mapas.

As funcionárias da Secretaria da pós-graduação da Engenharia Civil, em nome de Andréa Montenegro, Jecicleide Marques e Claudiana Pereira, pela atenção e apoio durante todos esses anos.

Aos companheiros e amigos gestores municipais da Região Metropolitana do Recife. Aos representantes das associações e cooperativas de materiais recicláveis, em nome de Sr. José Cardoso, do Movimento Nacional de Catadores, que sempre estiveram presentes atendendo ao chamamento para que os nossos trabalhos representassem a realidade da nossa região.

Agradecimento especial aos gestores e técnicos das Centrais de Tratamento de Resíduos, CTR Candeias, nas pessoas de Fábio Lopes e Fernanda Tartaruga, e da CTR PE, nas pessoas de Laércio Chaves e Luciano Burgo, que contribuíram para esta Tese com informações e dados consistentes sobre a disposição dos resíduos e operacionalização das centrais de tratamento e do projeto de MDL.

Finalmente, agradeço a todos, inclusive aqueles que, de alguma forma, dificultaram o nosso trabalho, pois isto nos serviu de desafio e nos fortaleceu.

*Quando se saciaram, disse Jesus aos seus discípulos:
"Recolhei os pedaços que sobraram para que nada se perca"
(João: Pag. 1391, 6.12 Bíblia Sagrada, 1971).*

RESUMO

As mudanças climáticas, suas causas e consequências são reconhecidas pela comunidade científica, governos, setor privado e a população em geral, que admitem a necessidade de reduzir as emissões, devido ao aquecimento global. A gestão de resíduos sólido urbano (RSU) gera gases de efeito estufa (GEE), diretamente pelas emissões do processo ou indiretamente através do transporte e do consumo de energia. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática (IPCC) aponta o setor de resíduos como potencial emissor pela geração do gás metano (CH_4), que é até 28 vezes maior do que o dióxido de carbono (CO_2). Esta pesquisa objetivou avaliar a contribuição do setor de resíduos na Região Metropolitana do Recife (RMR) às emissões de GEE e definição de cenários de mitigação para cumprimento da Contribuição Nacional Determinada (NDC) brasileira, fruto do Acordo de Paris. Para tanto realizou-se uma pesquisa exploratória, iniciando-se por uma revisão literária, seguida por análise documental, levantamento de dados requisitado para utilização do modelo do IPCC (2006). Foram realizadas visitas técnicas e entrevistas com gestores municipais e com os responsáveis técnicos pelos locais de disposição dos RSU. A RMR tem uma área de 3.216.262 km^2 , uma população estimada de 4.054.866 habitantes, geração de 3.657.650,36 kg/dia de resíduos e composta por 15 municípios. Estimou-se que no período estudado foram emitidas 25,4 milhões de tCO_2e , dos quais 49% são provenientes da cidade do Recife, 15% de Jaboatão dos Guararapes, 13% de Olinda, e 23% dos 12 demais municípios. Em uma análise comparativa entre os valores absolutos definidos para NDC brasileira e aqueles encontrados nos cenários de mitigação, observou-se que seriam evitadas aproximadamente 36 milhões de tCO_2e , pela disposição de RSU na RMR, equivalente a 52% de redução nas emissões em 2030, superior aos 47% assumidos pelo país no Acordo de Paris em 2015. Se as políticas públicas e investimentos previstos nos cenários forem efetivados, a RMR atenderá a NDC Brasileira evitando emissões e contribuindo para redução das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Políticas Públicas. Emissões de GEE. NDC Brasileira. CO_2 equivalente. Protocolo de Quioto.

ABSTRACT

Climate change, its causes and consequences, are currently recognized and accepted by the scientific community, governments, the private sector and the population in general, who admit the need for actions to reduce emissions of greenhouse gases (GHG), for its contribution to global warming and climate change. All solid urban waste management (MSW) practices generate GHG, either directly emissions from the process itself or indirectly through transport and energy consumption. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) points to the waste sector as one of the potential emitters of GHG, mainly due to the emission of methane (CH₄), which is up to 28 times higher than carbon dioxide (CO₂). The general objective is to evaluate the contribution of the solid waste of the Metropolitan Region of Recife to GHG emissions and to define mitigation scenarios to attend the Determined National Contribution (NDC), of the Paris Agreement's. To this end, an exploratory research, starting with a literary review, followed by documentary analysis and data collection required to use the IPCC model (2006). Technical visits and interviews with municipal managers and the technicians responsible for the MSW disposal sites was carried out. The RMR has 3,216,262 km² and 4,054,866 inhabitants. The estimated waste generation for 2018 was approximately 3,657,650.36 kg / day and consist of 15 municipalities. It was estimated that during the study period, 25.4 million tCO₂e, were emitted, of which 49% came from the city of Recife, 15% Jaboatão dos Guararapes, and 23% of the 12 other municipalities. In a comparative analysis between the absolute values defined for Brazilian NDC and those found in the mitigation scenarios, it was observed that approximately 36 million tCO₂e, would be avoided, due to the MSW provision in the RMR, equivalent to a 52% reduction, in 2030, higher than 45% assumed by the country in the Paris Agreement in 2015. If the public policies and investments envisaged in the scenarios are implemented, the RMR will meet the Brazilian NDC by avoiding emissions and contributing to the reduction of climate change

Keywords: Public Policies. GHG. Brazilian NDC. Equivalent CO₂ equivalent. Kyoto Protocol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estimativas de emissões de GEE, Brasil (1990/2005).....	29
Figura 2 –	Emissões anuais antropogênicas de GEE (1970 - 2010).....	37
Figura 3 –	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	41
Figura 4 –	Percentuais assumidos na NDC brasileira.....	45
Figura 5 –	Impactos regionais do aquecimento global	49
Figura 6 –	Áreas inundáveis em Recife.....	51
Figura 7 –	Comparação das emissões por setor e disposição em aterro sanitário	54
Figura 8 –	Comparação das emissões por setor e disposição em aterro controlado	55
Figura 9 –	Comparação das emissões por setor e disposição em lixões	55
Figura 10 –	Destino final dos resíduos sólidos no Estado de Pernambuco.....	63
Figura 11 –	Hierarquização da gestão integrada de RSU	66
Figura 12 –	Alternativas tecnológicas aplicáveis à recuperação energética a partir de RSU	71
Figura 13 –	Fases de biodegradação da matéria orgânica em aterro sanitário.....	72
Figura 14 –	Aumento de emissões de GEE em função da destinação de RSU.....	79
Figura 15 –	Principais categorias de emissões por setor do IPCC 2006	84
Figura 16 –	Pontos de emissões no manejo dos RSU	89
Figura 17 –	Emissões e redução para atividades diferentes (tCO ₂ e).....	92
Figura 18 –	Reciclagem e emissões de GEE na UE.....	93
Figura 19 –	Fluxograma da metodologia.....	94
Figura 20 –	Regiões de desenvolvimento do Estado de Pernambuco.	95
Figura 21 –	Abrangência espacial da Região Metropolitana de Recife	96
Figura 22 –	Projeção da população da RMR (2015 a 2035).....	98
Figura 23 –	Funções públicas de interesse comum	101
Figura 24 –	Processo de formação do consórcio metropolitano.....	102
Figura 25 –	Árvore de decisão	104
Figura 26 –	Espacialização dos locais de disposição estudados.....	108

Figura 27 –	Locais de disposição de RSU (2006 a 2018).....	109
Figura 28 –	Distribuição da geração per capita nacional por faixa populacional.....	110
Figura 29 –	Resíduos dispostos na CTR Candeias (2007 a 2018).....	116
Figura 30 –	Resíduos dispostos na CTR PE.....	117
Figura 31 –	Comparação dos valores de entrada no modelo do IPCC na RMR	119
Figura 32 –	Média da composição gravimétrica da RMR	127
Figura 33 –	Locais de disposição dos RSU na RMR (2018).....	130
Figura 34 –	Resíduos dispostos por categoria de manejo (t/ano)	132
Figura 35 –	Percentuais de materiais recicláveis na RMR	133
Figura 36 –	Localização da disposição de RSU na RMR	137
Figura 37 –	Quantidade de municípios por locais de disposição (2006 e 2018).....	137
Figura 38 –	% de RSU por locais de disposição	138
Figura 39 –	CH ₄ gerado por município da RMR	139
Figura 40 –	Potencial de dióxido de carbono emitido na RMR	140
Figura 41 –	Emissões por municípios da RMR por faixa de CO ₂ e emitido	141
Figura 42 –	Dióxido de carbono emitido pelos lixões na RMR	142
Figura 43 –	Estimativa CO ₂ e por aterro controlado	143
Figura 44 –	Percentual CO ₂ e por aterro controlado.....	144
Figura 45 –	Estimativa de emissões de dióxido de carbono por aterro sanitário	144
Figura 46 –	Geração de CO ₂ e por componente gravimétrico	145
Figura 47 –	Estimativa de CO ₂ e – Cenário Base.....	147
Figura 48 –	Estimativa da emissão de CO ₂ e por lixões, aterros controlados e sanitários - Cenário C1	149
Figura 49 –	Estimativa da emissão de CO ₂ e pelos aterros sanitários - Cenário C1.....	149
Figura 50 –	Estimativa de CO ₂ e por Lixões, aterros controlados e sanitários - Cenário 2	150
Figura 51 –	Estimativa de CO ₂ e pelos aterros sanitários - Cenário 2	150

Figura 52 –	Estimativa de CO2e. Lixões, Aterro controlado e sanitários – C3	151
Figura 53 –	Estimativa de CO2e aterros sanitários - Cenário 3.....	150
Figura 54 –	Projeção das emissões em função dos cenários.....	152
Figura 55 –	Comparação entre os cenários	153
Figura 56 –	Valores decrescentes entre os cenários C1,C2 e C4.	153

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Contribuição do setor de resíduos sólidos para atingir os ODS.....	42
Quadro 2 –	Instrumentos de política pública para cumprimento das metas da NDC Brasileira.....	46
Quadro 3 –	Características físico-químicas dos resíduos e sua importância.....	66
Quadro 4 –	Formas de tratamento, processo, evolução e inovação.....	68
Quadro 5 –	Tecnologias de tratamento, influência nas emissões e mitigação.....	69
Quadro 6 –	Vantagem do aproveitamento energético a partir da captação do Biogás.....	73
Quadro 7 –	Relação das cooperativas /associações na RMR.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Projetos de MDL registrados por país	40
Tabela 2 –	Opções de mitigação para cumprimento da NDC brasileira.....	46
Tabela 3 –	Emissores de gases de efeito estufa -GEE	52
Tabela 4 –	Distribuição das emissões brasileiras/resíduos sólidos (2016).....	53
Tabela 5 –	Destinação dos RSU em Pernambuco.....	62
Tabela 6 –	Comparação dos resíduos disposto nos anos de 2012, 2016 e 2018.....	64
Tabela 7 –	Dados de entrada do modelo do IPCC 2006 no experimento.....	77
Tabela 8 –	Metas a serem alcançadas para atingir a PNRS.....	78
Tabela 9 –	Processo de tratamento do biogás e expectativas de redução de emissões.....	80
Tabela 10 –	Potencial de aquecimento global e fontes de emissões (GWP).....	86
Tabela 11 –	Potencial de aquecimento global - relatórios do IPCC.....	86
Tabela 12 –	População urbana dos municípios da RMR 2016 e 2018	97
Tabela 13 –	Caracterização dos locais de disposição estudados.....	107
Tabela 14 –	Quantidade de municípios por faixa populacional.....	110
Tabela 15 –	Geração per capita adotada para os municípios da RMR (2005 a 2020).....	112
Tabela 16 –	Quantidade de RSU dispostos no aterro controlado de Ipojuca (2013/2018).....	114
Tabela 17 –	Quantidade de resíduos admitidos para o aterro controlado de Aguazinha /Olinda (2006/2010).....	114
Tabela 18 –	Quantidade de resíduos admitidos o município de Paulista.	115
Tabela 19 –	Quantidade de resíduos admitidos para o município de Camaragibe.....	115
Tabela 20 –	Valores recomendados para o tempo de meia vida ($t_{1/2}$) e para a constante cinética de decaimento (k).....	118
Tabela 21 –	Valores recomendados para o fator de correção do metano (MCF).....	118
Tabela 22 –	Dados de entrada do modelo do IPCC (2006).....	119
Tabela 23 –	Composição gravimétrica - RMR/PE.....	121

Tabela 24 –	Valores estimativos de redução de CO ₂ e do PDD (2011 a 2018).....	122
Tabela 25 –	Valores obtidos no monitoramento do projeto MDL (2016)..	122
Tabela 26 –	Valores para fator de oxidação – OX (IPCC 2006)	123
Tabela 27 –	Classificação das constantes por componentes gravimétrico.....	123
Tabela 28 –	Cenários adotados para mitigação de GEE na RMR	126
Tabela 29 –	Composição gravimétrica em função dos cenários (%)	127
Tabela 30 –	População, RSU coletado e geração per capita (2018)	131
Tabela 31 –	Potencial máximo de recicláveis na RMR.....	134
Tabela 32 –	Quantidade de município por local de disposição na RMR....	138
Tabela 33 –	Metas de emissões e limites para NDC Brasileira (tCO ₂ e)....	146
Tabela 34 –	Valores estimados para os cenários (2025 e 2030) (tCO ₂ e) .	152
Tabela 35 –	Comparação entre valores absolutos admissíveis (2005) e emissões na RMR	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Fator de normalização de soma
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpezas Pública e Resíduos Especiais
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
AICV	Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida
ANCAT	Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis
AR	Relatório do IPCC
CDM/UNFCCC	Relatório de Monitoramento/Convenção - Quadro sobre Mudanças Climáticas
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CEMPRE	Compromisso Empresarial para reciclagem
CETESB	Companhia Estadual de Saneamento Básico
CIBIOGÁS	Centro Internacional de Energia Renováveis
CMMAD	Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento
CNMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONDEPE/FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco
CONDERM	Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife
CPO	Conferências das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTR	Central de Tratamento de Resíduos
DDOCCM	Quantidade de Carbono Orgânico Degradável passível de decomposição
DOC	Carbono Orgânico Degradável

DOCf	Fração do DOC Degradável
DS	Desenvolvimento Sustentável
EIA/RIMA	Estudo de Impactos Ambientais/Relatório de Impacto Ambiental
F	Fração de Metano no Biogás
FBMC	Fórum Brasileiro de Mudanças do Clima
FIDEM	Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife
FOD	Decaimento de Primeira Ordem
FUNDERM	Fundo de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG Protocol	Protocolo de Gases de Efeito Estufa
GIZ	Agência Alemã de Cooperação Internacional
GRS/UFPE	Grupo de Resíduos Sólidos/Universidade Federal de Pernambuco
Gt CO ₂ e	Giga Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente
GWP	Potencial de Aquecimento Global
Hab./Km ²	Habitantes por Quilômetros Quadrado
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
INC	Comitê Intergovernamental de Negociação
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPT	Instituto de Pesquisa de Tecnologias
ISO	Organização Internacional de Padronização
ISWA	Associação Internacional de Resíduos Sólidos
k	Constante de Decaimento
Kg/ano	Quilograma por Ano
Kg/hab./dia	Quilograma por habitante dia
LO	Potencial de Geração de Metano
LULUCF	Emissões do Desmatamento do Setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas

M ³ CH ₄ /t	Metros Cúbicos de Metano por Tonelada
MCF	Fator de Correlação do Metano Referente ao Gerenciamento dos Locais de Disposição
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MCTI	Ministério da Ciência Tecnologia, Inovação e Comunicação
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério de Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MNCR	Movimento Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis
MSW (t)	Resíduos Sólidos Municipal
MSW(f)	Fração de Resíduos Destinado ao Aterro no Ano
MtCO ₂ e	Milhões de toneladas de Dióxido de Carbono equivalente
NBR	Norma Brasileira
NDC	Contribuição Nacional Determinada
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organizações Meteorológicas Mundial
OX	Fator de Oxidação
PCR	Prefeitura da Cidade do Recife
PDD	Project Design Document
PDUI	Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado
PEEMC	Política Estadual de Enfretamento às Mudanças Climáticas
PEMC	Plano Estadual de Mudanças Climáticas
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PEVs	Pontos de Entrega Voluntária
PMS	Planos Municipais de Saneamento
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PNMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PNMC	Plano Nacional sobre Mudanças do Clima
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNS	Política Nacional de Saneamento
PNSB	Política Nacional de Saneamento Básico
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PSENCR	Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas do Recife
Q (t)	Quantidade de Resíduos
R	Metano Recuperado
RCE	Certificado de Redução de Emissões
RDM/PE	Região de Desenvolvimento Metropolitana de Pernambuco
RMR	Região Metropolitana do Recife
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAR	Segundo Relatório de Avaliação
SECID	Secretaria das Cidades
SEDUH	Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SEMAS	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade
SINIR	Sistema de Informação de Resíduos Sólidos
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informação de Saneamento
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SUASA	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
T	Ano do Inventário
TCE	Tribunal de Contas do Estado
tCO ₂ e	Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalente
TFI	Força Tarefa para o Inventário de Gases de Efeito Estufa
TM	Tratamento Mecanizado
TMB	Tratamento Mecanizado Biológico
t/d	Tonelada Dia
UNEP	Programa das Nações Unidas
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
US- EPA	Agência de Meio Ambiente dos Estados Unidos
UT	Unidade de Triagem
WBCSD	Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável
WRI	Instituto de Recursos Mundial

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carbono
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CFCs	Clorofluorcarbonos
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
HFCs	Hidrofluorcarbonos
N ₂ O	Óxido Nitroso
PFCs	Perfluorcarbonos
SF ₆	Hexafluorsulfúrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	24
1.2	JUSTIFICATIVA.....	26
1.3	OBJETIVO.....	30
1.3.1	Objetivo geral.....	30
1.3.2	Objetivo específico.....	30
1.4	ESTRUTURA DA TESE.....	30
2	REVISÃO LITERÁRIA	32
2.1	O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E METROPOLIZAÇÃO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	32
2.1.1	Urbanização e metropolização do Brasil.....	33
2.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO GLOBAL.....	35
2.3	O ENFRENTAMENTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS...	38
2.3.1	Mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL.....	39
2.3.2	Objetivos de desenvolvimento sustentáveis – ODS.....	41
2.3.3	Mudanças climáticas no contexto do Brasil.....	43
2.3.4	Mudanças climáticas no contexto de Pernambuco.....	46
2.3.5	Efeito das emissões de gases de efeito estufa no Brasil.....	47
2.3.6	Efeito das emissões de gases de efeito estufa na RMR.....	50
2.3.7	Contribuição de emissão de emissões de efeito estufa no Brasil e Pernambuco.....	51
2.4	A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	58
2.4.1	A gestão de resíduos sólidos no Brasil.....	58
2.4.2	A gestão de resíduos sólidos na Região Nordeste.....	61
2.4.3	A gestão de resíduos em Pernambuco.....	62
2.5	GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	65
2.5.1	Classificação e caracterização dos resíduos sólidos...	66
2.5.2	Etapas do gerenciamento de resíduos sólidos e relação com emissões de GEE.....	67

2.5.3	Sistema de tratamento.....	68
2.5.4	Modelo de geração de biogás.....	75
2.5.5	Formas inadequadas de disposição de resíduos.....	77
2.6	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O IPCC.....	81
2.6.1	Inventário de emissões de GEE – método do IPCC (2006).....	84
2.6.2	Setor de resíduos sólidos e oportunidades de mitigação dos gases de efeito estufa – GEE.....	89
3.	MATERIAIS E MÉTODO.....	94
3.1.	OBJETO DE ESTUDO – REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE	95
3.1.1	População.....	97
3.1.2	Aspectos fisiográficos.....	99
3.1.2.1	Clima.....	99
3.1.3	Governança interfederativa metropolitana.....	99
3.1.4	Estrutura da gestão consorciada.....	100
3.2	LEVANTAMENTO DE DADOS: DIAGNÓSTICO SITUACIONAL E INVENTÁRIO DE GEE.....	102
3.3	MODELO PARA ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE GEE.....	103
3.3.1	Equação do modelo do IPCC (2006) Tier 2.....	104
3.3.2	Locais de disposição estudados.....	107
3.3.3	Dados utilizados.....	109
3.3.3.1	Temporal.....	109
3.3.3.2	Geração <i>Per Capita</i>	110
3.3.3.3	Total de Resíduos Urbanos Dispostos.....	113
3.3.3.4	Parâmetros Importantes Para o IPCC, 2006	118
3.4	DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS.....	123
3.4.1	Parâmetros alterados nos cenários.....	126
3.4.2	Meta de redução de emissões da NDC.....	127
3.5	SOFTWARES UTILIZADOS.....	128
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	129
4.1	DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS..	129

4.1.1	A gestão dos resíduos sólidos.....	129
4.1.2	Geração de resíduos.....	131
4.1.3	Coleta seletiva e inclusão social dos catadores.....	133
4.2	TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL	136
4.2.1	Resíduos sólidos urbanos dispostos no solo.....	136
4.2.2.	Quantidade de resíduos sólidos urbanos dispostos no solo.....	138
4.3.	EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	139
4.3.1	Estimativas das emissões por municípios da RMR.....	139
4.3.2	Estimativas de emissões por locais de disposição.....	141
4.3.3	Estimativas por componentes gravimétricos.....	145
4.3.4	Estimativas das emissões conforme cenários.....	146
4.3.4.1	Cenário Base.....	146
4.3.4.2	Estimativas das Emissões - Cenário 1.....	148
4.3.4.3	Estimativas das Emissões - Cenário 2.....	150
4.3.4.4	Estimativas das Emissões – cenário 3.....	151
4.3.5	Análise comparativa das emissões dos cenários.....	152
4.3.6	Análise comparativa dos cenários com a NDC.....	154
5	CONCLUSÃO.....	155
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	157
	REFERÊNCIAS	159
	APÊNDICE A – ESPELHO DE PLANILHAS	171

1 INTRODUÇÃO

Nesta introdução constam a contextualização, justificativa, objetivo e estrutura da Tese.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, em 1992, trouxe o compromisso de construção de um desenvolvimento urbano que propiciasse condições à criação de cidades sustentáveis, para a atual e futura geração.

Mais da metade da população mundial (3,6 bilhões) encontram-se nas cidades. Em termos de crescimento, espera-se que em 2050 haverá um aumento de 5,6 para 7,1 bilhões de pessoas, ou 64% para 69% da população mundial. Só na produção dos materiais necessários para suportar esse crescimento urbano, será gerada a metade das emissões permitidas de carbono, ou seja, cerca de 10 bilhões de toneladas, caso se pretenda atender à meta de limite máximo de aumento de temperatura média do planeta de 2°C em 2100 (PBMC, 2016).

As mudanças climáticas, suas causas e consequências são reconhecidas pela comunidade científica, governos, setor privado, organizações não governamentais e pela população em geral, que admitem a necessidade de ações para redução das emissões dos gases de efeito estufa, pela sua contribuição no aquecimento global.

O Quinto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas apresenta evidências de que o planeta está aquecendo e a ação humana é um dos fatores mais relevantes nesse processo (PBMC, 2016), assim como, que as principais contribuições de emissões decorrem das cidades. Os centros urbanos são responsáveis pelo consumo de 70% da energia disponível e por 40% das emissões de GEE (ROSENZWEIG *et al.*, 2011; ECF, 2014).

Um dos mais importantes subprodutos da vida das cidades são os resíduos sólidos, que se destacam entre os principais causadores de impactos ambientais e de geração de gases de efeito estufa, em especial o gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), oriundos da industrialização e urbanização (IPCC, 2014).

Segundo IPCC (2014) em termos globais, as emissões relacionadas com o setor de transporte e do consumo energético são os que mais contribuem para as mudanças climáticas, cujas emissões equivalem entre 26% a 30 % da geração total global, respectivamente. Aponta que o setor de gestão de resíduos contribui com percentual relativamente menor de GEE, porém não menos importante. O setor de resíduos representa cerca de 3 a 5 % das emissões globais antropogênicas de GEE (IPCC, 2014 e 2016). Por outro lado, o setor é considerado com maior potencial de mitigação, inclusive com rebatimento em outros setores, como o de energia e da agricultura.

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) consolida-se como uma das muitas questões ambientais prementes do mundo contemporâneo. Neste sentido, Jacobi e Besen (2011), ressaltam que um dos maiores desafios com que se defronta a sociedade moderna é o equacionamento da geração excessiva e da disposição final ambientalmente segura dos resíduos sólidos.

MOREIRA (2012) enfatizou que a questão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) atinge todos os países, inclusive aqueles em desenvolvimento, como é o caso do Brasil que, apesar de possuir grande extensão territorial, ainda tem problemas na busca de áreas adequadas para a disposição final dos seus RSU.

Em busca de soluções para o problema, a sociedade vem estudando cada vez mais formas de implantar sistemas de gestão integrada que minimizem o impacto ambiental da disposição dos resíduos e que sejam equacionados em conjunto

No Brasil, o marco legal do manejo de resíduos sólidos foi definido pela Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), Lei n. 11.445, de 2007, (BRASIL, 2007), na qual os planos de resíduos sólidos devem integrar os Planos Municipais de Saneamento (PMSB). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305 de 2010, (BRASIL, 2010), que define princípios e diretrizes, além da obrigatoriedade dos Planos de Resíduos, como um dos principais instrumentos da gestão. De forma complementar, a Lei 11.107, de 2015, (BRASIL, 2015), dos Consórcios Públicos, constitui instrumentos de gestão compartilhada entre os entes da federação, possibilitando a gestão associada, através de associações voluntárias de entes federados, por convênio de cooperação ou consórcio público. Enquanto isso, a Lei 11.079/2004, (BRASIL, 2004), traz todo o arcabouço legal para o

estabelecimento de parcerias público-privadas, promovendo a participação necessária do setor privado.

A Lei 13.089/2015, BRASIL (2015), que institui o Estatuto da Metrópole, traz no seu bojo a necessidade da definição de funções públicas de interesse comum para as regiões metropolitanas. Neste sentido, a temática de resíduos sólidos vem sendo discutida como uma função pública, pela geração de RSU, que é considerada de alto potencial de emissões de Gases de efeito estufa (GEE).

Neste contexto, verifica-se que o arcabouço legal e técnico relacionados à temática, no Brasil, além de estabelecer princípios para a elaboração de planos de gestão, traz políticas públicas de vanguarda para o setor de resíduos e das mudanças do clima, com ênfase em ações coordenadas pelas diversas instâncias de governo para a minimização da geração de resíduos; a logística reversa; a valorização dos resíduos com a geração de empregos por meio da reciclagem; pelo correto tratamento dos materiais dispostos, e pelo aproveitamento do subproduto dos RSU, como o biogás, para evitar danos ao meio ambiente e propiciar a redução das emissões de GEE, em conformidade com as diretrizes internacionais para o enfrentamento das mudanças climáticas e do compromisso da Contribuição Nacional Determinada (NDC) brasileira, fruto do Acordo de Paris.

As emissões de GEE têm sido objeto de estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) que foi criado em 1988, por iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM), com a finalidade de proporcionar avaliações integrais com conhecimentos científicos, técnicos e socioeconômicos sobre mudanças climáticas, suas causas, repercussões e estratégias de resposta.

1.2 JUSTIFICATIVA

A geração de resíduos mundial continuará aumentando nas próximas décadas, impulsionada pelo crescimento populacional, urbanização e mudança de padrões de consumo e produção.

Segundo UNEP – ISWA (2015) a geração *per capita* de resíduos em países de baixa e média renda de RSU variava entre 50-400 kg/ano, enquanto os países de rendimento elevado produziam 300-790 kg/ano (Eurostat, 2017). Entretanto, dois bilhões de pessoas em todo o mundo ainda não têm acesso aos serviços de coleta

de resíduos e três bilhões de pessoas não têm acesso a instalações adequadas de disposição de resíduos (UNEP / ISWA, 2015). Por outro lado, os resíduos orgânicos dispostos em aterro é a principal fonte de emissões de metano (CH₄) (IPCC, 2014). Essas emissões são projetadas para potencialmente aumentar quatro vezes em 2050, se comparado a 2010, devido ao maior crescimento populacional e desenvolvimento econômico em países de baixa e média renda (UNEP, 2010) e ainda pela melhoria na gestão dos RSU.

Emissões globais de GEE provenientes do setor de resíduos atingiram cerca de 1,5 GtCO₂e em 2010, dos quais aproximadamente 0,6 GtCO₂e decorrente da disposição de resíduos sólidos, 0,75 GtCO₂e de efluentes e o remanescente da incineração e outros tratamentos de resíduos (IPCC, 2014). Em 2016 foram 1,6 GtCO₂e (SEEG, 2017).

Uma abordagem holística à gestão de resíduos tem consequências positivas nas emissões de GEE, decorrente do setor de energia, silvicultura, agricultura, mineração, transporte e setores de fabricação (UNEP, 2011). Outro aspecto a considerar é que a priorização da prevenção e recuperação de resíduos, como materiais secundários ou energia, para intensificar os benefícios para o clima e atenuar as alterações climáticas é mais que uma alternativa, uma vez que o aumento significativo de melhores práticas da gestão de resíduos nas condições anaeróbias em aterros sanitários significa um aumento na geração de gás metano.

É importante destacar que embora a prevenção de resíduos esteja no topo da “hierarquia de gestão de resíduos”, mundialmente, e na legislação nacional, geralmente recebe menor atenção e alocação de recursos. Decorre que o setor dos resíduos informal tem uma contribuição significativa, mas geralmente é ignorada para a economia de recursos, de recuperação e da geração de gases de efeito estufa nas cidades de nações em desenvolvimento (USEPA, 2009).

Neste sentido, deve ser dada a prioridade ao fim do desperdício, minimização, reutilização, reciclagem, recuperação energética dos resíduos e, em último caso, aterro para os rejeitos. A Associação Internacional de Resíduos Sólidos ISWA (2009), assim descreveu: a hierarquia dos resíduos é uma ferramenta conceitual e política de priorização e suporte nas estratégias de gestão de resíduos destinadas a limitar o consumo de recursos e proteger o ambiente (ISWA, 2009).

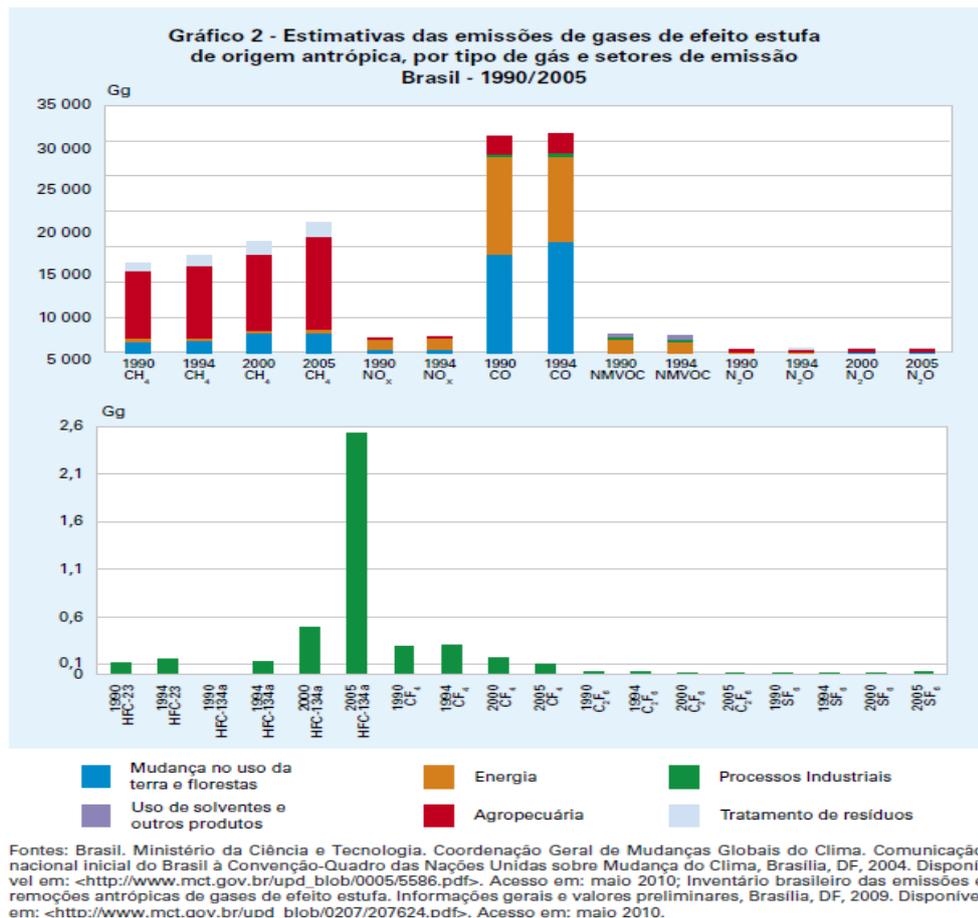
Adicionalmente toda prática de gestão de resíduos gera Gases de Efeito Estufa, de forma direta pelas emissões do próprio processo ou indiretamente através do transporte e do consumo de energia, por exemplo (UNEP / ISWA, 2015).

A magnitude real das emissões de GEE é difícil de determinar, por causa da escassez e da confiabilidade dos dados de produção, composição, gestão dos resíduos e imprecisão dos modelos de emissões que dependem do levantamento da quantidade de resíduos dispostos no solo, do conhecimento da composição gravimétrica e características dos resíduos em geral, assim como das condições ambientais das áreas onde a disposição é realizada, como, por exemplo, temperatura e precipitação (UNEP / ISWA, 2015).

Um dos métodos que poderia ser utilizado para realizar as estimativas das emissões de GEE é o método de Avaliação do Ciclo de Vida de (ACV) e Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV). A AICV fornece análises extremamente úteis dos potenciais impactos climáticos e benefícios das várias opções de gestão de resíduos, com base em indicadores de sustentabilidade ambiental, econômica e social REICHER (2013). Entretanto, segundo MCTIC (2016), devido às disponibilidades de recursos e dados, estudos de ACV estão focados principalmente em cenários apropriados aos países desenvolvidos, cujos resultados não são necessariamente transferíveis para outros países, o que dificultam comparações globais dos inventários das emissões de GEE. O Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação e Comunicação (MCTIC) do Brasil, utiliza como diretriz técnica básica para a estimativa anual nacional, os documentos elaborados pelo Painel Intergovernamental de Mudança Climática (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC).

O Brasil atendendo o compromisso assumido nas conferências das partes (COP) das Nações Unidas de redução das emissões, desenvolveu uma plataforma de atuação e publicou relatórios com inventários das emissões e das condições climáticas brasileiras. Segundo MCTI (2005, 2010 e 2016) a contribuição do setor de resíduos tem aumentado gradativamente (Figura 1). Por exemplo, se em 2005 a contribuição foi de 2,1% das emissões nacionais de CO₂e, em 2015 esse percentual subiu de 4,6%.

Figura 1 - Estimativas de emissões de GEE, Brasil (1990/2005)



Fonte: IBGE (2010)

Pernambuco e a Região Metropolitana do Recife (RMR) integraram os levantamentos realizados para o inventário das estimativas gases de efeito estufa, no período de 1990 a 2005 (FIRMO, 2009).

Neste contexto, pretende-se, a partir da caracterização das emissões do setor no período 1990 a 2005, estimar as emissões do período de 2006 a 2030 e analisar cenários de mitigação no âmbito das políticas públicas para a gestão de resíduos sólidos urbanos domiciliares, que melhor contribuam para a redução dos gases de efeito estufa e atendimento das metas da Contribuição Nacional determinada (NDC) brasileira, tendo como objeto de estudo a Região Metropolitana de Recife (RMR), do estado de Pernambuco/Brasil, composta por 15 municípios com aproximadamente 4.054.866 habitantes (IBGE, 2018), cuja estimativa de geração de resíduos é de 1.423.091,16 t/ano, equivalente a aproximadamente 60% de total gerado no Estado.

1.3 OBJETIVOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram estabelecidos objetivos geral e específicos.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a contribuição do setor de resíduos sólidos urbanos da Região Metropolitana do Recife (RMR) às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e de cenários de mitigação para cumprimento da Contribuição Nacional e Determinada (NDC), fruto do Acordo de Paris em 2015.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos definidos foram os seguintes:

- a) levantar informações: dados primários e secundários relativos à gestão de resíduos sólidos e mudanças climáticas;
- b) caracterizar a gestão dos resíduos sólidos urbanos domiciliares na RMR, no período de 2006 a 2018;
- c) estimar as emissões de GEE pela disposição dos RSU na RMR, até 2030, tomando como base o ano de 2005;
- d) definir cenários para redução das emissões de GEE; e
- e) determinar as emissões a serem evitadas para atingir a NDC brasileira, em 2025 e 2030.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta Tese é composta da introdução, que contém uma contextualização a respeito da gestão dos resíduos sólidos, informações sobre questões relacionadas às emissões de gases de efeito estufa (GEE) e impactos nas mudanças climáticas; da justificativa para a pesquisa; objetivo geral e os específicos e da estrutura da tese. Além dos seguintes capítulos: capítulo 2, no qual consta a revisão bibliográfica, com foco no processo de urbanização e metropolização das cidades, na gestão dos

resíduos sólidos, e as mudanças climáticas; o terceiro, que contém a metodologia e as atividades desenvolvidas para a obtenção dos objetivos da tese. No quarto estão apresentados os resultados e discussões, enquanto que no quinto estão expostas as considerações finais e recomendações. Em seguida, encontram-se as referências pesquisadas.

2 REVISÃO LITERÁRIA

Esta revisão literária tem como foco processo de urbanização e metropolização das cidades, as mudanças climáticas e a gestão dos resíduos sólidos urbanos.

2.1 O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E METROPOLIZAÇÃO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A população mundial cresce constantemente, sobretudo nas cidades e nas metrópoles. A Urbanização é um fenômeno que está ligado ao crescimento populacional e territorial das cidades, somados aos fluxos migratórios, principalmente das populações rurais num êxodo rural TODA MATERIA (2018).

Com o crescimento acelerado das cidades metropolitanas e com seus processos de conurbação, problemas urbanos como os de transportes, água, esgotos, limpeza urbana, manejo dos resíduos sólidos, uso do solo, dentre outros, não devem ser tratados isoladamente em cada cidade, mas em conjunto. Daí o surgimento da definição de áreas ou regiões metropolitanas como um conjunto de municípios contíguos e integrados socioeconomicamente à uma cidade central, com serviços públicos e infraestruturas comuns (ALGOSOBRE, 2018).

A hegemonia da cidade sobre o campo ocorre num processo de urbanização e metropolização crescente. Estima-se que até dois terços da população mundial devem viver em cidades até 2050 (TODA MATERIA, 2018). Esse processo de metropolização consiste em um processo de integração de território a partir de uma cidade-núcleo, configurando um território ampliado, em que se compartilha um conjunto de funções de interesse comum (IPEA, 2010).

A metropolização tem sido uma das mais profundas tendências socioeconômicas demográficas nas últimas décadas, particularmente em regiões menos urbanizadas e desenvolvidas, estando associada ao aumento da renda, que por sua vez, os rendimentos urbanos mais elevados estão correlacionados com maior consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa/GEE (IPCC , 2014)

Outro aspecto a ser considerado é que o desenvolvimento econômico, a urbanização e o aumento dos padrões de consumo apontam para o crescimento na quantidade e complexidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU), como subprodutos

inevitáveis da atividade humana. Este fato favorece ao aparecimento de graves problemas sanitários, principalmente nos países em desenvolvimento (DIAS *et al.*, 2012).

Para lidar com a crescente pressão populacional, serão necessários investimentos em infraestrutura. Segundo as Nações Unidas mais de quatro bilhões vivem nas cidades e em 12 anos terão mais 1,5 bilhão de pessoas (UNEP, 2010). As metrópoles e megacidades já estão hoje chegando aos seus limites, e o maior afluxo de pessoas será vivenciado nas aglomerações com até cinco milhões de habitantes.

Forma urbana e infraestrutura urbana estão fortemente interligadas, assim padrões do uso da terra, padrões de consumo e produção, escolha de transporte, habitação e comportamento, são estratégias de mitigação efetivas das mudanças climáticas, envolvendo políticas que se reforçam mutuamente.

As diferenças no nível de desenvolvimento econômico entre países e regiões afetam seu nível de vulnerabilidade às mudanças do clima, bem como à sua capacidade de adaptação ou mitigação (IPCC, 2014). Ao mesmo tempo, as disparidades entre e dentro das regiões diminuem as oportunidades que os países têm de empreender políticas de mitigação efetivas.

Segundo IPCC (2014), as opções de mitigação das questões das mudanças climáticas nas áreas urbanas variam de acordo com as trajetórias de urbanização e metropolização.

2.1.1 Urbanização e metropolização do Brasil

O processo de urbanização no Brasil teve início no século XX, sobretudo com o êxodo rural, ou seja, com o deslocamento de pessoas do campo para as cidades em busca de melhores condições de vida, provocando um aumento da população em zonas urbanas em detrimento das zonas rurais.

A urbanização da sociedade brasileira foi marcada por um processo migratório intenso. A princípio, as migrações predominantemente eram do tipo rural-urbano, mas, a partir da década de 70, intensificaram-se os deslocamentos “urbano-urbano”, destacando-se os movimentos populacionais para os grandes aglomerados urbanos, com a formação das regiões metropolitanas (SERRANO, 2009).

Outro fator de relevância para a urbanização brasileira foi o processo de industrialização dos centros urbanos, que trouxe maiores ofertas de trabalho, causando um aumento populacional significativo nos centros urbanos.

A questão metropolitana aparece, pela primeira vez no Brasil, na Constituição Federal de 1967, art. 164.

A União, mediante Lei complementar, poderá, para realização de serviços comuns, estabelecer Regiões Metropolitanas constituídas por municípios que, independentemente de sua vinculação administrativa, façam parte de uma mesma comunidade sócio – econômica (CF, 1967).

Por definição, no Brasil, pela Lei Complementar Federal 14/1973, são consideradas Regiões Metropolitanas as regiões de entorno das grandes capitais: São Paulo, Belo Horizonte, Porto Alegre, Recife, Salvador, Curitiba, Belém e Fortaleza. Além disso, os estados brasileiros consideram aglomerações urbanas e microrregiões, agrupamentos de municípios limítrofes, conurbados ou não, que demandam integração de políticas de interesse comum (SERRANO, 2009).

Neste sentido, com a promulgação do Estatuto das Cidades, Lei 10.257/2001 (BRASIL, 2001), diversos instrumentos de caráter urbanístico que possibilitam a redistribuição do acesso à cidade e o reequilíbrio dos interesses coletivos foram disponibilizados em oposição a interesses meramente individuais, ligados à propriedade e aos processos de acumulação de capital.

Desta forma, o tamanho, a complexidade e a intensa conurbação das metrópoles brasileiras compõem um panorama socioeconômico e político de tal ordem que análises intra-urbanas não podem abstrair-se de informações microlocalizadas (FURTADO, 2009). MENDONÇA (2001) completa que a industrialização, a produção, circulação e consumo de mercadorias, dentre outros fatores ou fatos, e a concentração populacional nas cidades que se intensificou nos dois últimos séculos, tanto promoveram a explosão urbana quanto introduziram paulatinamente a geração de resíduos e a degradação dos ambientes urbanos. Esta realidade moderna passou então a exigir, do Estado Brasileiro, iniciativas no sentido de ordenar o desenvolvimento dos aglomerados humanos e a intervenção no equacionamento dos problemas daí decorrentes.

2.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO GLOBAL

Os primeiros movimentos internacionais para debater as questões relacionados ao meio ambiente e desenvolvimento surgiram no início da década de 70, com a realização, em 1972, em Estocolmo (Suécia), da 1ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano. Somente a partir da Conferência de Estocolmo é que a questão ambiental se tornou uma preocupação verdadeiramente global e passou, de forma definitiva, a fazer parte das negociações internacionais (GAMA, 2003). Neste contexto o primeiro reflexo foi a criação de um mecanismo institucional para tratar de questões ambientais no âmbito das Nações Unidas, surgindo assim, ainda em 1972, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA, com sede em Nairóbi, Kenya.

Na década de 80, foi criada a Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento – CMMAD, em 1983, que publicou o estudo intitulado “Nosso Futuro Comum” ou “Relatório Brundtland” - em reconhecimento à coordenadora da comissão, a então Primeira Ministra da Noruega, GroBrundtland -, na qual o crescimento para todos foi defendido e buscava-se um equilíbrio entre as posições antagônicas que surgiram a partir de Estocolmo. Nesse sentido, tentando conciliar o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente, foi concebida a definição de desenvolvimento sustentável (DS) como: Aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras em atenderem as suas próprias necessidades CMMAD (1987).

No mesmo ano de 1987, o Protocolo de Montreal define prazos, limites e restrições à produção, ao comércio e ao consumo das substâncias ambientalmente impactantes, como CFC e outros para a proteção da camada de ozônio.

Na década de 90, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento – CNMAD, no Rio de Janeiro/Brasil, em 1992, conhecida como Eco 92, ou Cúpula da Terra. Nesta conferência participaram mais de 178 países, 102 chefes de Estado, cerca de 4.000 Organizações Não-Governamentais, atraindo mais de 15 mil pessoas com o objetivo de elaborar estratégias para conter a degradação ambiental, bem como promover o desenvolvimento sustentável. Foram resultados deste evento os documentos abaixo relacionados:

- a) declaração do Rio de Janeiro sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento sustentável;
- b) convenção sobre Mudanças Climáticas, denominada de Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas - UNFCCC;
- c) declaração de Princípios sobre Florestas;
- d) convenção da Diversidade Biológica;
- e) agenda 21.

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) é um tratado ambiental internacional adotado e aberto para assinaturas no contexto da Eco/92. Entrou em vigor a partir de março de 1994, com a ratificação de um número suficiente de países e em dezembro de 2015 tinha 197 partes (países) aderentes, o que deu legitimidade à Convenção. A UNFCCC tem como objetivo "estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em um nível que evite interferências antropogênicas perigosas com o sistema climático" CMMAD (1992). Para tanto foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática (IPCC) em 1988.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas mostra resultados alarmantes, desde cenários que preveem para 2080 um aumento de temperatura de 1°C a 7,5°C. e um aumento no nível do mar de até 1,3 metros. Estas alterações implicaria em grandes impactos sobre toda forma de vida da Terra, devido às alterações nos ciclos biogeoquímicos (água, carbono e nitrogênio), elevação dos níveis dos mares e oceanos, a ocorrência de enchentes e secas, a migração de populações em busca de locais seguros e bem-estar, a salinização de terras, o impacto nas fontes de água potável, no turismo e na agricultura (IPCC, 2007).

Os Gases de Efeito Estufa (GEE) regulados pela Convenção de Mudanças Climáticas e pelo Protocolo de Quioto são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), CFCs - clorofluorcarbonos, hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluorsulfúrico (SF₆). No entanto, de acordo com IPCC (2007), os principais GEE são: o metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), cuja presença na atmosfera contribui para o aquecimento global e mudanças do clima.

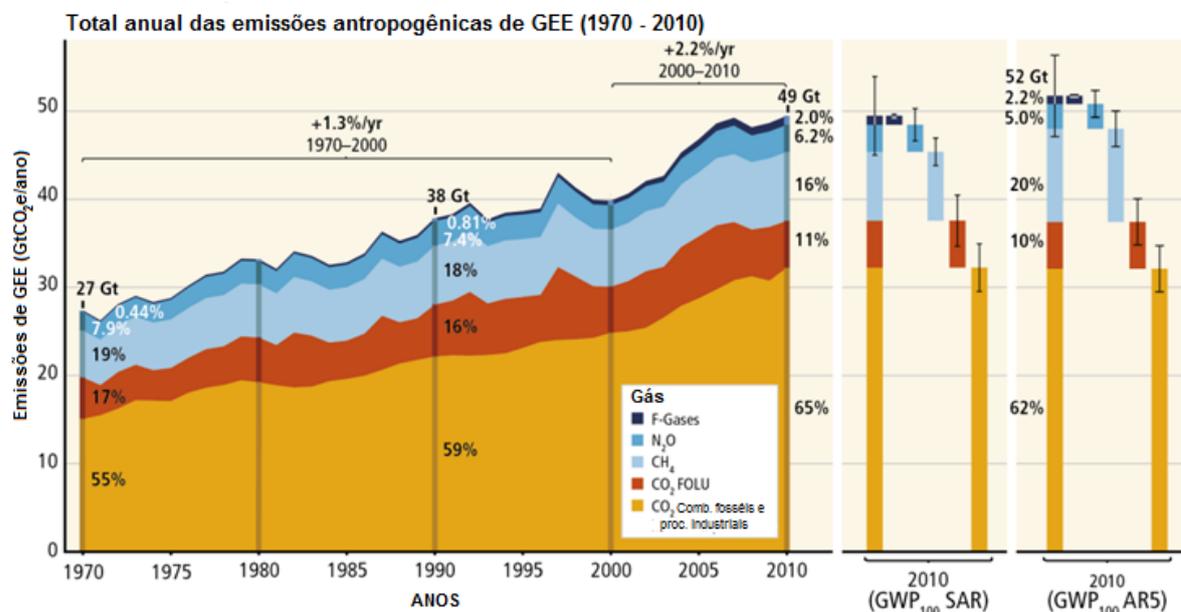
No âmbito da geração das emissões de GEE, decorrente da disposição dos resíduos, aquelas provenientes do metano são mais potentes do que as do CO₂,

com uma métrica para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) 21 a 28 vezes superior, considerando-se o horizonte temporal de 100 anos (SEEG,2017).

Segundo o 5º Relatório do IPCC (2016), as principais causas das mudanças climáticas são as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa que vêm aumentando desde a era pré-industrial, impulsionada principalmente pelo crescimento econômico e populacional. Isso levou a concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso sem precedentes em pelo menos 800 mil anos. Seus efeitos, juntamente com os de outros aspectos antropogênicos, foram detectados em todo o sistema climático como sendo a principal causa do aquecimento observado desde meados do século 20.

Na Figura 2 apresenta-se as emissões anuais antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) em GtCO₂-eq / ano, para o período de 1970 a 2010.

Figura 2 – Emissões anuais antropogênicas de GEE (1970 - 2010)



Fonte: IPCC (2016)

O lado direito da Figura 2 mostra as emissões de 2010, utilizando alternativamente ponderações de emissão equivalentes de CO₂, calculadas com base nos valores de Potencial de Aquecimento Global de 100 anos (GWP100) de 21, do Segundo Relatório de Avaliação (SAR) do IPCC (2000) e do Quinto Relatório (AR5) IPCC (2016), cujo (GWP100) é 28, onde pode ser observado aumento na

contribuição das emissões anuais globais de GEE, de 49 para 52 GtCO₂eq / ano, de metano, confirmando a tendência de crescimento a longo prazo.

O Relatório Especial “Global Warming of 1,5 °C” sobre o impacto do aquecimento global de 1,5 °C (UNEP, 2018), demonstrou que o mundo já superou a barreira de 1º Celsius de aquecimento em relação aos níveis pré-industriais, e que seres humanos e não humanos já sentem os efeitos negativos das mudanças climáticas. Ressalta que furacões nos EUA, tufões sem precedentes na Ásia, crises hídricas em grandes metrópoles, secas na Europa e inusitados incêndios nas tundras no Ártico foram registrados nos últimos anos.

De acordo com o referido relatório, a temperatura média da superfície do planeta subiu cerca de 0,6 °C desde o final do século XIX, existindo 95% de possibilidade de que a atividade humana esteja ligada ao aquecimento global. Se o aquecimento seguir o ritmo atual, as temperaturas médias mundiais atingirão o patamar de 1,5°C entre 2030 e 2052 (UNEP, 2018).

Segundo (UNEP, 2018), para limitar o aquecimento em 2º Celsius até 2100, será necessário eliminar em 20% as emissões de gases estufa até 2030, em relação aos níveis de 2010, e zerar as emissões em 2075.

Neste contexto, verifica-se que o desafio para o enfrentamento da mudança do clima é enorme e cuidar das questões das mudanças climáticas é premente e de responsabilidade de todos.

2.3 O ENFRENTAMENTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As diretrizes para a governança climática global é parte integrante do texto da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC, sigla em inglês), elaborado pelo Comitê Intergovernamental de Negociação (INC) durante reunião em Nova York, em 1992. Uma das primeiras tarefas estabelecidas pela UNFCCC foi que os países signatários estabelecessem inventários nacionais de emissões e remoção de gases de efeito estufa, os quais deveriam ser utilizados para estabelecer os níveis de referência do ano 1990 e o compromisso dos países integrantes do Protocolo de Quioto com relação às reduções de GEE, os quais deveriam ser enviados anualmente ao UNFCCC.

Em 1997, o Protocolo de Quioto foi concluído e estabeleceu obrigações juridicamente vinculativas para os países desenvolvidos reduzir suas emissões de

gases de efeito estufa no período 2008-2012, tendo sido alterado em 2012 para abranger o período 2013-2020.

Em 2005 foi realizada a reunião para avaliar o progresso no tratamento das mudanças climáticas. Em 2010 os acordos de Cancun afirmam que o futuro aquecimento global deveria ser limitado a menos de 2,0 °C (3,6 °F) em relação ao nível pré-industrial. Em 2009, na COP realizada em Copenhague, foi pactuado Acordo de adoção de medidas de mitigação às mudanças climáticas e, em 2011, no Acordo de Durban, foi revisto o período de vigência para o Protocolo de Quioto MCTIC (2016).

Em dezembro de 2015, o Acordo de Paris foi assinado regulamentando as reduções de emissões a partir de 2020, num esforço das nações signatárias para adotar uma economia de baixo carbono até o fim deste século, uma vez que o efeito do aquecimento global já se sente em todo o planeta. O Acordo de Paris entrou em vigor em 4 de novembro de 2016 e, entre outras medidas, tem o objetivo de manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais e de garantir esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C (MMA, 2017).

Na COP 24, realizada na Polônia, em dezembro de 2018, foram definidas regras a serem cumpridas a partir do ano 2020 e que possibilitarão a implementação do Acordo de Paris por todos os países signatários, devendo todas as nações, incluindo os países em desenvolvimento, detalhar os seus esforços para a redução de emissões.

Neste contexto, para enfrentamento das mudanças climáticas, os governos possuem à sua disposição uma variedade de políticas e instrumentos a serem aplicados por meio de medidas de mitigação e adaptação, sendo que sua aplicação dependerá de circunstâncias específicas a serem mensuradas por cada nação (IPCC, 2012).

2.3.1 Mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL

O Protocolo de Quioto, em 1997, introduziu três mecanismos de mercado, sendo um deles o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que viabiliza o alcance de metas de redução com um melhor custo-benefício por meio da emissão

de Redução Certificada de Emissão (RCE) e comercialização de créditos de carbono (FIRMO, 2013).

No entanto, os projetos de MDL demandam um investimento muito alto para um retorno financeiro baixo, inviabilizando a sua execução ABRELPE (2016). Porém, os outros benefícios que não são financeiros devem ser considerados, como a mitigação do impacto ambiental causado pelo biogás e o potencial energético no setor de resíduos sólidos.

Segundo ABRELPE, (2016) em junho de 2012, foram formulados nos termos do MDL, 10.266 projetos, porém em fins de dezembro daquele ano, apenas um total de 5.511 projetos foram registrados perante a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC).

A China é o país com o maior número de projetos MDL registrados, com 48,9% do total de projetos. O Brasil está em terceiro lugar, com 4,7% dos projetos. Conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Projetos de MDL registrados por país

País	% Projeto registrado no CDM
China	48,94
Índia	19,85
Brasil	4,90
México	3,27
Vietnã	2,93
Malásia	2,51
Indonésia	1,79
Outros	2,51

Fonte: Adaptado de ABELPRE (2016)

O setor de manejo e destinação de resíduos sólidos representa 13% do total de projetos MDL registrados. Isto inclui projetos de aterros, aproveitamento de resíduos (compostagem, incineração, gaseificação, etc.), manejo de esterco e águas residuais. Os projetos de MDL nos aterros sanitários têm como premissas o biogás emitido durante a decomposição dos resíduos sólidos. A captação do metano gerado pode ser transformada em fonte de energia. Desta forma, além de aproveitar o potencial energético da decomposição dos resíduos, evita-se a emissão de GEE e suas consequências ambientais ABRELPE (2016).

Segundo o Atlas Brasileiro de Emissões de GEE (ABRELPE, 2016), foram identificados no Brasil um total de 46 projetos MDL dentro da ação “13: ação para mitigar as mudanças climáticas, categoria - manejo e destinação de resíduos, subcategoria de aterros sanitários” dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS.

Segundo ABRELPE (2016) a região Sudeste é a que tem maior número de projetos, totalizando 33 projetos. Em seguida, vem as regiões Nordeste, Sul e Norte com 07, 04 e 02 projetos, respectivamente. Estes projetos se encontram em diferentes etapas do ciclo de um projeto MDL. Dentre os 07 projetos da Região Nordeste, 02 são do estado de Pernambuco e pertencem aos aterros sanitários privados da RMR, da CTR Candeias e Pernambuco.

2.3.2 Objetivos de desenvolvimento sustentável - ODS

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável constituem uma agenda universal, composta de 17 ODS, com 169 metas para 2015 a 2030. Aplicáveis a todos os países e refletem as dimensões econômica, social, ambiental e institucional, de maneira integrada, indivisível e transversal. Na Figura 3 encontram-se os 17 ODS

Figura 3 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: ONU (2015)

No Quadro 1 demonstra-se que a redução de emissões de gases de efeito estufa pelo setor de resíduos sólidos, decorrente de uma gestão sustentável de resíduos, é relevante tanto para a mitigação, como também para adaptação às

mudanças climáticas, e contribui para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

Quadro 1 - Contribuição do setor de resíduos sólidos para atingir os ODS

Objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)		Contribuição do setor de resíduos sólidos
1.	Erradicação da pobreza	Geração de emprego e renda por meio da coleta, tratamento e disposição e do incentivo da cadeia produtivas dos materiais recicláveis.
2.	Fim da fome	Redução do desperdício de alimentos, valorização da fração orgânica dos RSU através da digestão anaeróbica, da compostagem, promovendo uma agricultura sustentável e geração de energia.
3.	Boa saúde e bem-estar	Redução dos vetores que impactam a saúde da população com a eliminação da queima a céu aberto e da disposição inadequada em lixões.
4.	Educação de qualidade	Promoção da educação para os familiares e dos trabalhadores da área de limpeza urbana, tratamento e disposição. Não permissão do trabalho infantil na cadeia produtiva dos RSU.
5.	Igualdade de gênero	Melhoria das condições de trabalho das mulheres no setor de resíduos, em especial na coleta seletiva.
6.	Água limpa e saneamento	Eliminação de RSU nos corpos hídricos com a universalização da coleta.
7.	Energia limpa e acessível	Aproveitamento do potencial energético dos RSU.
8.	Trabalho digno e crescimento econômico	Incremento de empregos formais no setor de RSU. Potencialização do mercado da cadeia produtiva dos materiais recicláveis.
9.	Infraestrutura, indústria e inovação	Inovações tecnológicas no manejo dos resíduos sólidos.
10.	Redução das desigualdades	Eliminar ambiente que propicie o crescimento da pobreza, com a gestão adequada dos resíduos.
11.	Cidades e assentamentos seguro e sustentável	Acesso aos serviços básicos, inclusive aos serviços de limpeza urbana e manejo dos RSU.
12.	Consumo e produção sustentável	Eliminar desperdício e adoção de produção e consumo com princípios da circularidade.
13.	Combate às mudanças climáticas	Queima e/ou aproveitamento energético do gás metano pela disposição em aterros e lixões.
14.	Conservação e uso sustentável dos oceanos	Não lançamento de RSU no solo e corpos hídricos para que os mesmos não cheguem ao mar. Prevenção do lixo marinho.
15.	Proteção e conservação dos ecossistemas terrestres	Não lançamento de resíduos no solo e corpos hídricos.
16.	Instituição forte, sociedade pacífica e inclusiva	A boa governança municipal, como indicadores de sustentabilidade.
17.	Parceria para atingir as meta	Envolvimento de todos os setores da sociedade, do setor público e privado.

Fonte: Adaptado de UNEP (2016)

2.3.3 Mudanças climáticas no contexto do Brasil

Com a participação do Brasil na Conferência das Nações Unidas para o Ambiente Humano, de Estocolmo/Suécia, realizada em 1972, medidas efetivas com relação ao meio ambiente foram tomadas pelo país. Em 1981, foi criada a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), que instituiu a Secretária Especial de Meio Ambiente e o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), e criou o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONSEMA), estabelecendo responsabilidade entre os entes da federação. Em 1986 a primeira Resolução CONAMA estabeleceu diretrizes para avaliação de Impacto Ambiental (AIA), os Estudos de Avaliação Ambiental e o Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), como instrumento de planejamento dentro da PNMA.

No entanto, o passo decisivo para a formulação de uma legislação ambiental integrada, em nível federal, estadual e municipal, foi a promulgação da Constituição Federal em 1988. O Congresso Brasileiro, influenciado pelo Relatório Nosso Futuro Comum – Brundtland, dedicou o artigo 225 ao meio ambiente, dividindo entre o governo e a sociedade civil a responsabilidade pela sua preservação e conservação. Todos têm direito ao Meio Ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida (CF, 1988).

Para o enfrentamento das questões do clima, em 2007, o governo brasileiro criou a Secretaria de Mudança Climática, subordinada ao Ministério do Meio Ambiente, e com base no trabalho da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima o Brasil lançou em 2008 o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), o qual se comprometia com a redução de 70 por cento no desmatamento até 2017.

Em 2009, o Parlamento Brasileiro aprova a Lei 12.187/2009 da Política Nacional das Mudanças Climáticas (PNMC), assim como um conjunto de metas voluntárias de redução dos gases de efeito estufa, entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020. Em 2010, com regulamentação da PNMC, por meio do Decreto 7.390/2010 BRASIL (2010b), fica determinada a elaboração de planos setoriais e é feita a Segunda Comunicação Nacional (MCTI, 2013). Em seguida, em 2012, o Brasil faz consulta pública sobre os planos setoriais.

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação é o responsável pela implementação da PNMC e pela publicação das estimativas anuais

de emissões de gases de efeito estufa no Brasil em formato apropriado para facilitar o entendimento por parte dos segmentos interessados da sociedade (MCTI, 2013).

Neste contexto, o MCTI tem capitaneado a elaboração da Comunicação Nacional do Brasil à Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima, estando na sua 3ª Comunicação. Os 1º, 2º e 3º Inventários Nacional de Emissões Antrópicas e Remoções por Sumidouro de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal, foram publicados em 2010, 2013 e 2016 respectivamente.

O Brasil, em 2008, elaborou o seu GHG Protocol, nome em inglês que significa Protocolo de Gases de Efeito Estufa, uma adaptação do documento elaborado em 1998 pelo World Resources Institute (WRI) e a World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), visando orientar as organizações e corporações na elaboração de inventário das emissões.

O GHG Protocol Nacional é uma ferramenta compatível com a norma International Organization for Standardization – ISO 14064 -1:2006 e com os métodos de quantificação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), dispendo de diretrizes para *definição* dos limites organizacionais e operacionais; coleta de dados das atividades que resultam na emissão de GEE; cálculo das emissões; adoção de estratégias de gestão e apresentação dos resultados.

No Brasil, a ABNT NBR ISO 14064/2007, dos "Gases de Efeito Estufa", tem como base a própria ISO 14064-19 e as diretrizes do GHG Protocol, estando direcionada para as organizações, para projetos, para validação e verificação de declarações relativas a gases de efeito estufa.

O Acordo de Paris passou a vigorar no plano internacional em novembro de 2016, no entanto, o Brasil já havia depositado o instrumento de ratificação em setembro de 2016, assumindo o compromisso de adotar medidas para redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) por meio de uma Contribuição Nacional Determinada (NDC).

A NDC brasileira aplica-se ao conjunto da economia e, portanto, baseia-se em caminhos flexíveis para atingir os objetivos de 2025 e 2030, considerando sua condição de país em desenvolvimento (MCTIC, 2017), com vários desafios relacionados à erradicação da pobreza, educação, saúde pública, emprego, habitação, infraestrutura e acesso a energia.

Apesar desses desafios, o Brasil no combate global à mudança do clima desenvolveu esforços, tendo reduzido suas emissões em mais de 41%, em 2012, com relação aos níveis de 2005 (KÄSSMAYER, FRAXE NETO, 2016).

A NDC brasileira contém o compromisso de reduzir as emissões de GEE em 37% em 2025 e 43% em 2030, tendo por referência o ano de 2005, em vários setores da economia, incluindo o setor de tratamento e disposição final de resíduos sólidos. O que equivale a um teto de emissões de 1.300 e 1.200 MtCO₂e em 2025 e 2030, respectivamente (MCTIC, 2017). (Figura 4).

Figura 4 - Percentuais assumidos na NDC brasileira



Fonte: MMA (2015)

O MCTIC, elaborou uma contribuição técnica para subsidiar as discussões sobre a estratégia nacional para a implementação da NDC do Brasil ao Acordo de Paris, tomando como base os resultados do Projeto "Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave no Brasil", executado em parceria com a ONU/Ambiente, apontando o papel que cada setor econômico pode desempenhar, inclusive o do subsetor de resíduos, segundo uma ótica de custo-efetividade, para o cumprimento das metas de emissões de GEE para 2025 e 2030.

O Estudo do MCTIC (2017) demonstrou que a ampliação da adoção de atividades de baixo carbono, como eficiência energética, co-geração de energia e aproveitamento de biogás, apresentam potenciais relevantes de mitigação, tendo sido indicados como instrumentos, medidas e ações que possibilitará o cumprimento das metas da NDC brasileira, para 2025 e 2030.

No Quadro 2, verifica-se que o instrumento de política pública para o setor de resíduos, para cumprimento da meta NDC brasileira, até 2025, é a regulamentação do biogás e para 2030 são a criação de linha de crédito a isenções e incentivos fiscais.

Quadro 2 - Instrumentos de política pública para cumprimento da NDC Brasileira.

Instrumento de política pública no setor de resíduos sólidos	Tipo de instrumento	
	2025	2030
Regulamentação do biogás proveniente de RSU e efluentes	Regulatório	-
Criação e ampliação de linhas de crédito para investimento em fontes renováveis e eficiência energética.	-	Mercado
Condicionamento da concessão de isenções e incentivos fiscais aos estados e municípios à implementação de contrapartida de gestão de baixo carbono -do RSU.	-	Regulatório

Fonte: Adaptado de MCTIC (2017)

Também foram definidas medidas de mitigação para alcançar as metas da NDC em 2025 e 2030 (Tabela 2).

Tabela 2 – Opções e potencial de mitigação para cumprimento da NDC brasileira.

Setor	Opções de mitigação	Potencial de mitigação (MtCO ₂ e)	
		2025	2030
Gestão de resíduos (RSU)	Degradação de biogás de aterro sanitário com flare.	5,4	20,8
	Aproveitamento de biogás para produção de biometano.	-	8,2
	Aproveitamento de biogás para geração de eletricidade	-	6,7
	Difusão de biodigestão para produção de eletricidade	-	0,9
	Difusão de biodigestão para biometano	-	2,1

Fonte: Adaptado de MCTIC (2017)

2.3.4 Mudanças climáticas no contexto de Pernambuco

No estado de Pernambuco, em 2008, foi criado um Comitê Estadual de Enfrentamento das Mudanças Climáticas por meio do Decreto N°. 31.507/2008

(PERNAMBUCO, 2008). Em 17 de Junho de 2010, a Lei Estadual Nº 14.090/2010 institui a Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas (PEEMC) de Pernambuco, com o objetivo de garantir que o poder público promova esforços necessários para aumentar a resiliência da população à variabilidade e às mudanças climáticas e contribuir para redução dos gases de efeito estufa, o qual estabelece vários instrumentos para sua implementação, entre eles o Plano Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) (PERNAMBUCO, 2011).

O Plano Estadual de Mudanças Climáticas (PERNAMBUCO, 2011), possui metas obrigatórias e os eixos temáticos: combate à desertificação, gerenciamento costeiro e gestão urbana. Uma das metas obrigatórias (não quantitativa) é a elaboração do inventário das contribuições do estado para as emissões brasileiras de gases de efeito estufa e redução das emissões com a geração de energia, inclusive para o setor de destinação final de resíduos sólidos. Em 2019, realizou-se o inventário das emissões do período de 2015 a 2018, e iniciou-se a revisão do PEMC do Estado.

2.3.5 Efeito das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil

A magnitude dos problemas gerados pelo desequilíbrio climático decorrente do aquecimento global pelas emissões de gases de efeito estufa proveniente de todos os países vem impactando a vida de todos os habitantes do planeta.

No Brasil a mudança climática, segundo o IPCC (2016), tem alterado, sobretudo, a temperatura e o clima, provocando grandes precipitações com inundações, ou por vezes grandes estiagens que provocam as secas e intensifica a tendência à desertificação .

Ainda, segundo o mesmo Relatório, o Brasil apresenta risco de mudança na dinâmica marítima devido à oscilação na taxa de transporte do sedimento.

Em setembro de 2019, o IPCC lançou o documento “The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate” aceito durante a 51ª Sessão do IPCC, no Principado de Mônaco. Neste documento, prevê-se que a perda de gelo no mar Ártico continue até meados do século, o que pode aumentar de 10-35% o aquecimento global, e que eventos extremos de El Niño e La Niña provavelmente aumentem de frequência no século XXI e se intensificará os riscos existentes, com

respostas mais secas ou úmidas em várias regiões do mundo. As projeções do aumento global do nível do mar até 2100 são maiores do que no Relatório AR5.

Na figura 5 podem ser observados os impactos regionais em todos os continentes, decorrentes das mudanças climáticas nos oceanos, podendo ser verificada alteração de temperatura, pH, causando a acidificação oceânica, a perda de oxigênio, redução da extensão do gelo marinho e do nível do mar que têm o potencial de agravar os impactos ambientais causados pelo aquecimento.

Figura 5 - Impactos regionais do aquecimento global

Atribuição		Oceano											LEGENDA				
		Ártico	EBUS ¹	Atlântico Norte	Pacífico Norte	Atlântico Sul	Pacífico Sul	Oceano Austral	Oceano Índico Temperado	Atlântico Tropical	Oceano Índico Tropical	Pacífico Tropical					
Gases de Efeito Estufa	Mudanças Físicas	Temperatura	••	•	••	••	••	••	••	••	••	••	••	•	Mudanças Físicas Aumentar Diminuir Aumentar e Diminuir		
		Oxigênio		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			
		pH do Oceano	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••			
		Ext. do Gelo Marinho	•••						•								
		Nível do mar	•	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••			
Mudanças Climáticas	Ecosistemas	Coluna de água superior	••	•	•••	••	••	••	••	•	••	•	••	Sistemas Positivo Negativo Positivo e Negativo Sem Avaliação			
		Coral			•			•••			•••	•••	•••				
		Costa de Pantanal			••	••	••	••		••	••	••	••				
		Floresta de algas	••	••	••	••	•	•		•			•				
		Costas rochosas			•••	••				•							
		Mar profundo				•											
		Bentos Polares	••						••								
		Associados de Gelo Marinho	••						••								
		Serviço do Sistema Humano e do Ecossistema	Serviço do Sistema Humano e do Ecossistema	Pescas	••	•	•••	•	•	•	•	•	••		•	•	Confiança atribuição ••• Alta •• Média • Baixa
				Turismos	••	•		•		•	•	•				•	
Serviços de habitat	••			•	••	••	•	••	•		••	••	••				
Transporte/Remessa	••																
Serviços culturais	••				•	•		•									
Sequestro de Carbono da Costa					••	••	•	•		•	•	••	•				

¹ Sistema de Ressurgência de Fronteira Oriental (corrente de Benguela, corrente das Canárias, corrente da Califórnia e corrente de Humboldt)

Fonte: Adaptado de IPCC (2019)

Neste contexto, as mudanças climáticas globais atingem todo o planeta, sendo necessário ressaltar que o Brasil é um dos países inclusos na lista de vulnerabilidade. Aumento de ocorrência de desastres naturais vem sendo observado em todo o país, tais como a seca que assola as regiões norte e nordeste do país, a intensificação das precipitações, junto aos fenômenos climáticos, a exemplo do El Niño e o fenômeno oposto La Niña que tem ocasionado o aumento das temperaturas do índice pluviométrico (chuvas) e tempestades, resultando em diversas catástrofes por todo o país. (TERRA, 2018). Os relatórios do IPCC (2010 e 2016) comprovam que a maioria dos desastres naturais no Brasil (mais de 80%) está intimamente relacionada às instabilidades atmosféricas, responsáveis pelas inundações, vendavais, tornados, granizos e deslizamentos de terra.

2.3.6 Efeito das Emissões de Gases de Efeito Estufa na RMR

De acordo com o Quinto Relatório do Intergovernamental do “Panel on Climate Change” (IPCC, 2016), a cidade do Recife, pertencente a RMR, está vulnerável ao aumento médio do nível do mar, ao aumento de precipitação e à elevação da temperatura média. Levando em consideração a alta densidade populacional de seu litoral, o percentual elevado de impermeabilização do solo e a sua baixa altitude, a cidade do Recife é considerada pelo IPCC um dos “*hotspots*” mundiais - áreas com grande biodiversidade, ricas principalmente em espécies endêmicas, e que apresentam alto grau de ameaça, estando sujeitas a maior vulnerabilidade aos efeitos das mudanças climáticas.

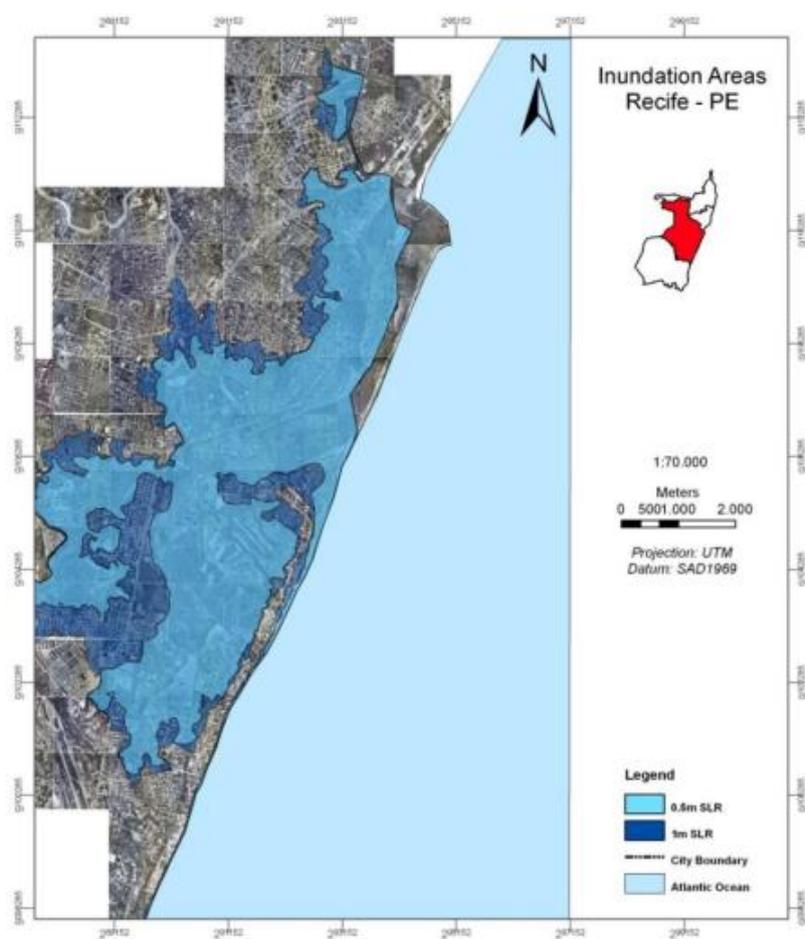
No contexto do Relatório do IPCC (2016), para a Região Metropolitana do Recife foi observado um cenário crítico, principalmente para a cidade do Recife, que apresenta grande vulnerabilidade de alagamentos nas áreas mais baixas, considerando um aumento do nível do mar de entre 0,70 e 4,7 m.

Segundo COSTA *et al.* (2010), que analisaram as zonas potencialmente inundáveis e da vulnerabilidade nas áreas costeiras da RMR, considerando as estimativas realizadas pelo IPCC, um aumento do nível do mar da ordem de 0,5 m (cenário otimista), é esperado que, pelo menos 39,32 km² da área dos municípios analisados constituam zonas potencialmente inundáveis. Num cenário crítico de elevação do nível do mar (1 m), este valor aumentaria para

53,69 km². A análise da costa como um todo indica que os 81,8% das construções urbanas, que estão a menos de 30 m da linha de costa e em terrenos abaixo de 5 m, deverão ser rapidamente atingidos pela mudança no nível do mar atual e que o litoral possui 45,7% de sua extensão sob zona de alta vulnerabilidade. Frente aos cenários simulados, aponta-se a necessidade de um planejamento público para mitigação dos futuros impactos.

Na Figura 6 apresentam-se as áreas possíveis de inundações na zona costeira da Cidade do Recife na RMR.

Figura 6 - Área inundáveis em Recife



Fonte: COSTA *et al.* (2010)

2.3.7 Contribuições de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil e em Pernambuco

Segundo estudos do Banco Mundial (2010), o Brasil estava em sétimo lugar no ranque dos 10 maiores emissores de GEE mundial, com a China e

Estados Unidos das Américas em primeiro e segundo lugar, respectivamente. Na Tabela 3, apresenta-se os 10 maiores emissores de gases de efeito estufa.

Tabela 3 - Emissores de gases de efeito estufa -GEE

. Emissores de gases de efeito estufa –GEE Países	% Emissões
1- China	23,7
2- Estados Unidos	12,9
3- União Europeia (28)	7,4
4- Índia	6,5
5- Indonésia	5,1
6- Federação Rússia	4,2
7- Brasil	3,4
8- Japão	2,7
9- Canadá	1,8
10- Alemanha	1,0

Fonte: SEEG (2017)

No Brasil, as contribuições para as emissões de GEE são provenientes de quatro setores. O primeiro, e o mais importante, é o setor de emissões do desmatamento e relacionadas ao uso da terra e às mudanças de uso da terra (conhecidas como emissões LULUCF, sigla em inglês). Seguido dos setores de energia, transportes e manejo de resíduos sólidos e líquidos, em função das emissões que produzem. No ano de 2008, as emissões desses três setores foram de 18, 14 e 5 por cento, respectivamente. Muito embora a contribuição do manejo dos resíduos tenha sido baixa em 2008, foi registrado um aumento de mais de 60% ao longo das duas últimas décadas. (BANCO MUNDIAL, 2010).

Em 2014, observou-se que cerca de 3,7% do total das emissões foi decorrente do setor resíduos, que mesmo sendo a menor parcela de contribuição de emissões com relação aos demais setores (mudança de uso da terra, energia, agropecuária e processos industriais), possui grande impacto na atmosfera devido à geração de gases com maior potencial de aquecimento global, como o metano (CH₄), 28 vezes mais potente que o CO₂, e o óxido nítrico (N₂O), 310 vezes mais potente.

Analisando os estudos realizados no Brasil, observa-se que a evolução das emissões proveniente do tratamento de resíduos teve um crescimento exponencial no período 1970 a 2010, principalmente no período 1990-2010,

onde cresceu 161%, com posterior estabilização no período de 2010 a 2015, apresentando uma taxa de 10%, e entre 2015 e 2016 ocorrendo um declínio de -1%, nas estimativas de emissões de GEE. No contexto geral verifica-se que houve um aumento de 13 milhões de toneladas de CO_{2e}, em 1970 para 91,97 milhões de toneladas de CO_{2e}, em 2016 (SEEG, 2017; MCTI, 2016).

Segundo o SEEG (2017), o total de emissões do Brasil no ano de 2016 para o setor de resíduos foi de aproximadamente 92,00 MtCO_{2e}, dos quais 52,93 MtCO_{2e} provenientes da disposição dos resíduos sólidos.

Para o setor de resíduos a contribuição das emissões está dividida em 4 subsetores: disposição no solo, tratamento de efluentes líquidos industriais, tratamento de efluentes líquidos domésticos, e de incineração dos resíduos de saúde e industrial. Dentre os quatro principais subsetores de resíduos, verifica-se que a disposição dos RSU no solo é o mais expressivo em termos de emissões, representando 57,5 %, em média, da origem das emissões nos últimos 44 anos (SEEG, 2017). Na Tabela 4 encontra-se a contribuição dos resíduos em função dos subsetores em 2016.

Tabela 4 – Distribuição das emissões brasileiras/resíduos sólidos (2016)

Setor de resíduos	MtCO _{2e}	%
Disposição de RSU no solo	52,95	57,5
Tratamento de efluentes líquidos industriais	20,92	22,7
Tratamento de efluentes líquidos domésticos	17,85	19,4
Incineração de resíduos de saúde (RSS) e Industriais (RSI)	0,29	,030

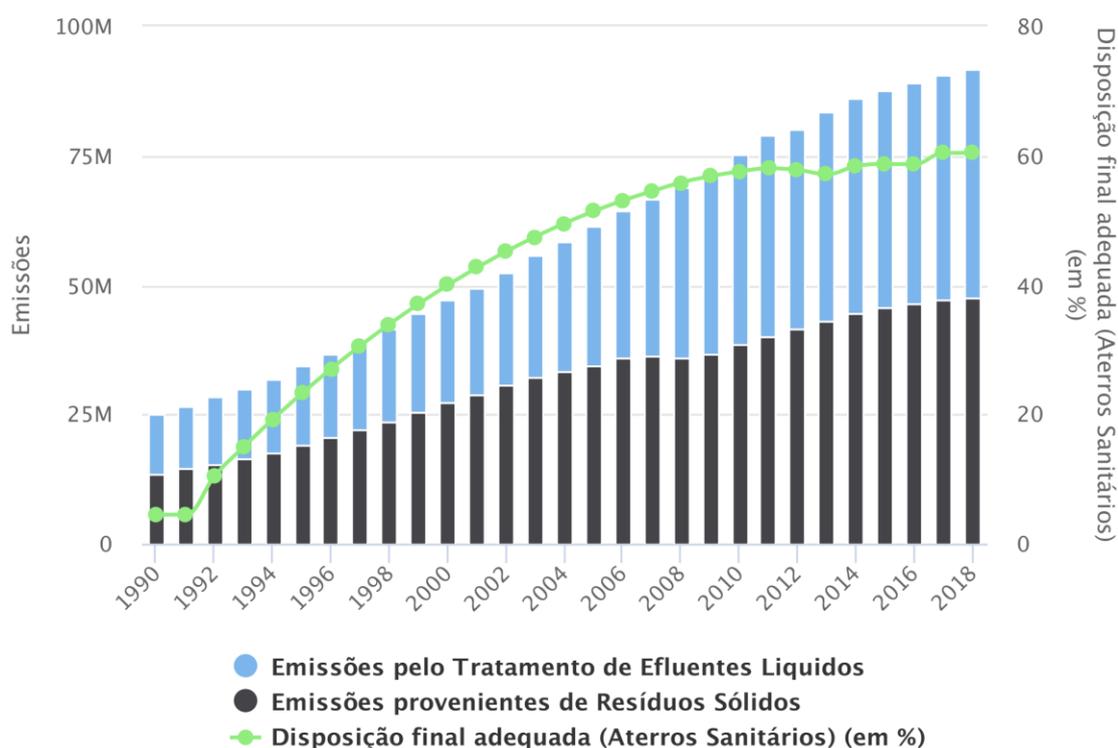
Fonte: Adaptado de SEEG (2017)

Nas últimas décadas a disposição de resíduos no solo ocorria em aterro sanitário, aterro controlado, lixões, que de acordo com (ABRELPE, 2016; SEEG, 2017; FIRMO 2009; JUCÁ *et al*, 2014) são categorias de disposição que têm contribuições diferentes entre si, pois o aterro sanitário gera mais metano do que o aterro controlado e do que os lixões. Nos aterros sanitários, a decomposição da matéria orgânica ocorre em condições anaeróbias mais propícias.

Nas Figuras 7, 8 e 9 encontram-se as emissões provenientes do setor de resíduos, comparando-o com a forma de disposição em aterro sanitário, aterro controlado e lixões num temporal de 1990 a 2018.

O Relatório da SEEG (2020) destaca o decaimento nas emissões dos resíduos dispostos em lixões, devido ao encerramento dos mesmos em atendimento à legislação ambiental, enquanto que nos aterros controlado e sanitários a tendência é o crescimento, devido a maior disposição nessas unidades, visto que ocorre maior geração de gases .

Figura 7 - Comparação das emissões do setor de resíduos e disposição em aterro sanitário



Fonte: SEEG (2019)

Figura 8 - Comparação das emissões do setor de resíduos e disposição em aterro Controlado

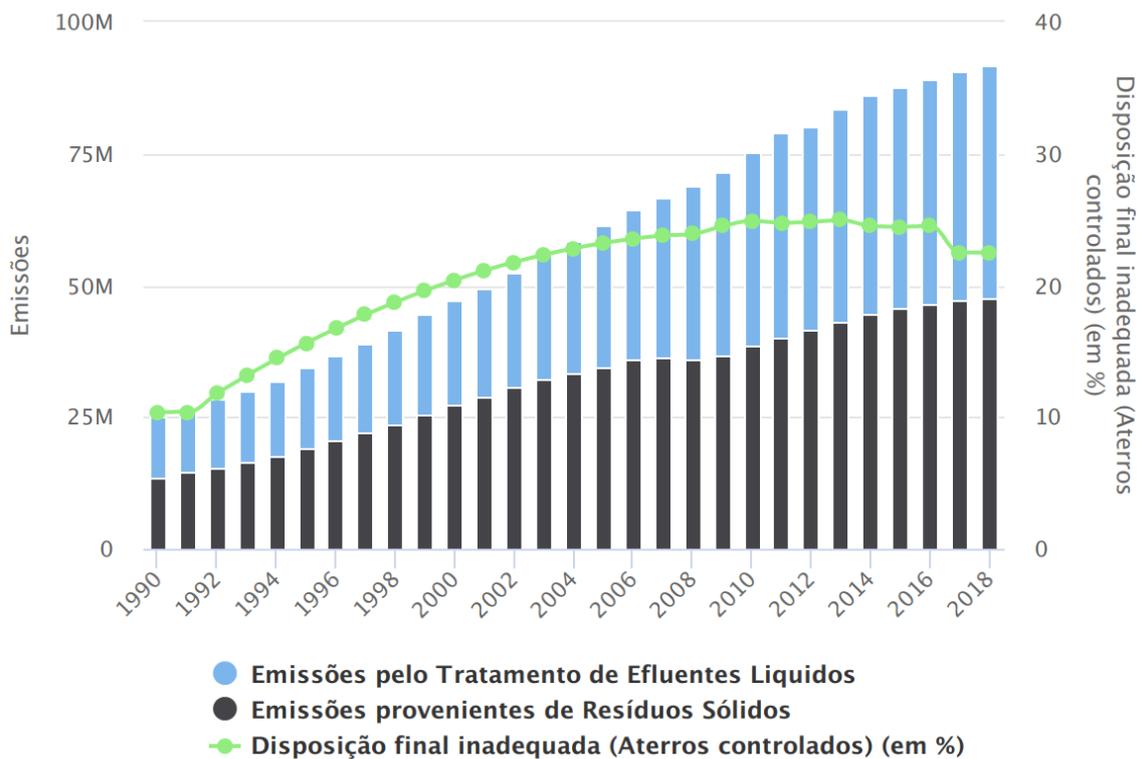
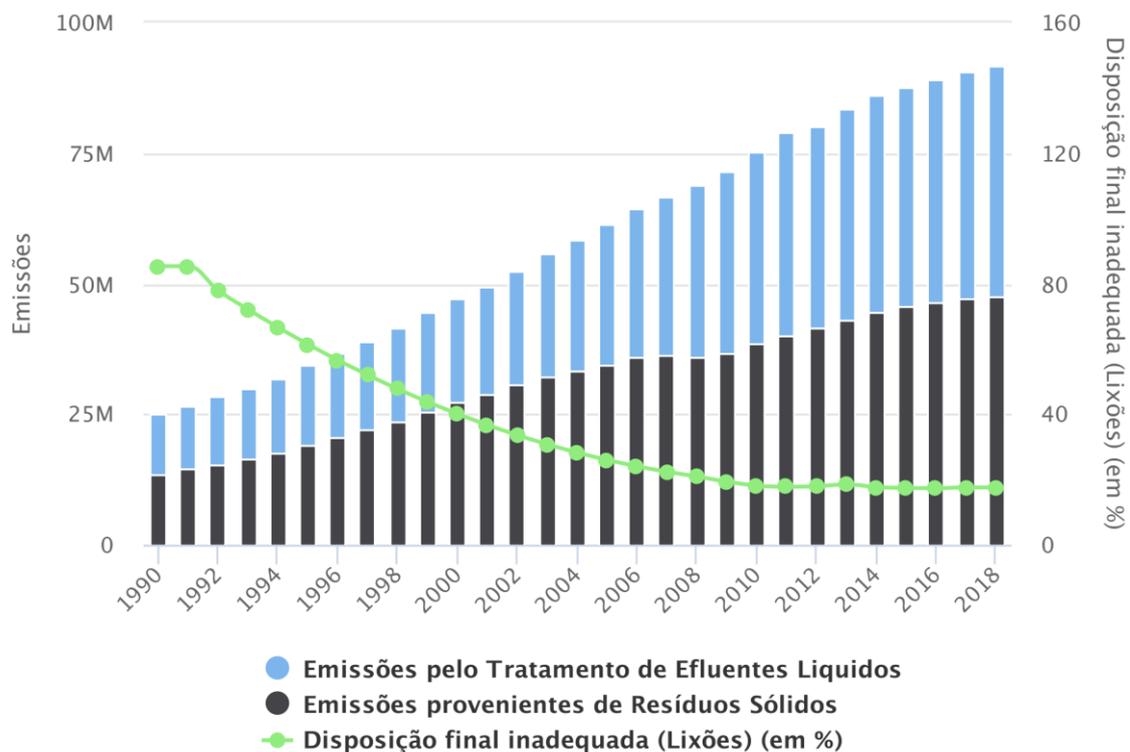


Figura 9 - Comparação das emissões do setor de resíduos e disposição em lixões



Segundo SEEG (2017), o Brasil emitiu 1,558 bilhão de toneladas de gás carbônico equivalente (tCO₂e) em 2016, que representa uma redução de 0,9% em relação ao 1,571 bilhão de toneladas emitidas em 2013 (emissões brutas).

O estado de Pernambuco, segundo o estudo da SEEG (2017), ficou em 20º lugar no ranking das emissões nos estados brasileiros, em 2016, com 24.328.651 MtCO₂e. O setor de resíduos contribuiu com 13% das emissões, dos quais 64% refere-se ao tratamento de resíduos e 36% ao tratamento de efluentes, e neste contexto a contribuição de Pernambuco, considerando-se o setor de resíduos, foi de aproximadamente 2,1 e 1,2 MtCO₂e, respectivamente.

O Observatório do Clima/SEEG, lançou na Conferência Nacional de Mudanças do Clima, em Recife, em 2019, o Relatório Síntese, com uma análise das emissões brasileiras de GEE para o período de 1970 a 2018 (SEEG,2019), apontando que o setor de resíduos, juntamente com o setor de processos industriais, responde pela menor parcela de emissões no Brasil (5%), com 91,9 milhões de tCO₂e em 2018. Porém, mesmo sendo aparentemente baixo, essa cifra representa um crescimento de mais de 600% desde 1970 e de 95% entre 2000 e 2018. Entre 2017 e 2018, o aumento foi de 1,3%.

Em 2005, objetivando a elaboração do Relatório de Referência do Setor de Resíduos para compor o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa para o período de 1990 a 2005, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) firmou convênio com o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e com a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que formou uma rede de apoio à elaboração do inventário, na qual o Grupo de Resíduos Sólidos (GRS/UFPE) foi responsável pela estimativa das emissões de GEE para o setor de resíduos no Norte e Nordeste (FIRMO, 2009). Neste estudo verificou-se que na RMR foram emitidos ao longo dos anos 1990 a 2005 (15 anos) cerca de 7 MtCO₂e, que contribuíram diretamente para a formação de GEE e aquecimento global, dos quais aproximadamente 60% advinha do município de Recife.

A partir das constatações do IPCC (2005) a Prefeitura da Cidade do Recife elaborou o seu 1º inventário de emissões de gases de efeito estufa, tendo como ano de referência 2012, que apontou o setor de resíduos como o segundo maior emissor de GEE, sendo responsável por 19,2% do total de emissões inventariadas, sendo 600.694 tCO₂e proveniente da disposição de

resíduos em aterro sanitário e 695.83 tCO₂e proveniente da incineração de resíduos de saúde (PCR, 2016).

Segundo PCR (2015), como resultado do primeiro inventário foi instituída pela Lei 18.011/2014 a Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas do Recife (PSEMCR, 2014), que estabelece instrumentos para a implementação, em nível municipal, de ações sustentáveis e de enfrentamento ao fenômeno do aquecimento global, e o Decreto 29.220/2015, que define as metas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa para os anos de 2017 e 2020.

Em 2016, a Prefeitura do Recife elaborou o Plano de Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) considerando o conjunto urbano, a qualidade de vida para os cidadãos e o resgate da identidade municipal (PCR, 2016).

As principais diretrizes para a redução das emissões de GEE e para enfrentamento das mudanças climáticas do Recife vão desde o incentivo à produção e consumo consciente, a ações que promovam a instalação de tecnologias que gerem energia a partir dos gases dos aterros sanitários e a ampliação da coleta seletiva para reduzir a disposição em aterro de materiais passíveis de serem reciclados.

A Cidade do Recife fez parte do Projeto Pegada de Cidades, financiado pelo Banco de Desenvolvimento da América Latina (CAF) e executado pelo Serviços Ambientais S.A (SASA), que teve como fruto a elaboração do Inventário de Emissões de Recife no período de 2012 a 2015, que indicou a maior parte das emissões é resultante do setor de transporte, e que o setor dos resíduos vem em segundo lugar, representando em média 19% das emissões no período, com 543.199, 557.136, 666.535 e 591.720 tCO₂e, nos anos de 2012 a 2015 (PCR, 2017).

Em 2019, o estado de Pernambuco sediou a Primeira Conferência Nacional de Mudança do Clima e como contribuição elaborou o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de Pernambuco referente ao período de 2015 a 2018 (PERNAMBUCO, 2019), no qual foi identificado que foram emitidas um total de 78.210.948,2 tCO₂e distribuídas em média nos setores da seguinte forma: AFOLU – Agricultura, pecuária e outros usos do

solo 27,75%, RS - Resíduos sólidos 27,35%, T- Transporte 25,23%, EE - Energia estacionária 18,35% e IPPPU - Processos industriais 1,3%.

Ressalte-se que as emissões do setor resíduos são decorrentes do tratamento de efluentes e dos resíduos sólidos urbanos, que contribuíram com 23.061.915,60 tCO₂e no período do inventário. Deste total 69,82% são efetivamente dos resíduos sólidos urbanos e 30,18% do tratamento de efluentes, correspondentes a aproximadamente 16 milhões de tCO₂e emitidos pela disposição dos RSU no estado de Pernambuco no período de 2015 a 2018 (PERNAMBUCO, 2019).

2.4 A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A gestão de resíduos sólidos compreende o conjunto das decisões estratégicas e das ações voltadas à busca de soluções, envolvendo políticas públicas, instrumentos e aspectos institucionais e financeiros. Com vista ao desenvolvimento sustentável, a questão requer o envolvimento de toda a sociedade, sendo pautada na não geração, seguida pela redução, reutilização, tratamento dos resíduos sólidos e, por fim, a disposição final adequada dos rejeitos (SÃO PAULO, 2013).

O crescimento demográfico, a intensidade das atividades humanas e a melhoria do nível de vida são responsáveis pelo aumento exponencial da quantidade de resíduos gerados, bem como pelas alterações das características, constituindo um grande problema para a administração pública (SÃO PAULO, 2013). Fato que se agrava pelo manejo inadequado desde a sua geração até a destinação final, muitas vezes ocorrendo a disposição em vazadouro a céu aberto, os conhecidos lixões, nas galerias de águas pluviais ou mesmo diretamente nos corpos hídricos que resulta em impactos ambientais, danos sociais e econômicos e em risco à saúde pública.

2.4.1 A Gestão de resíduos sólidos no Brasil

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pela Lei Federal 12.305/2010 (BRASIL, 2010) é o marco regulatório, definindo diretrizes para reduzir a geração de resíduos sólidos, combater a poluição e a inclusão

social dos catadores de materiais reciclados. A PNRS no art. 11, inciso I reza que incumbe aos Estados promover a integração da organização, do planejamento e da execução das funções públicas de interesse comum, relacionadas à gestão dos resíduos sólidos urbanos nas regiões metropolitanas, aglomerações urbanas e microrregiões, isso nos termos do § 3º do art.25 da Constituição Federal de 1988, permitindo a perspectiva da prestação regionalizada dos serviços de saneamento, na forma prevista no art. 14 da Lei Federal 11.445/2007 (BRASIL, 2007).

A legislação federal definiu, de forma uniformizada, os potenciais serviços de interesse comum, como o planejamento para o desenvolvimento econômico e social, o saneamento (água, esgoto, gestão de resíduos sólidos e drenagem), o uso e ocupação do solo, o transporte e as estradas, a gestão de recursos hídricos e o controle de poluição ambiental (SOMEKH, 2010).

Com relação à gestão de resíduos sólidos, para a realidade brasileira, a geração de RSU registrou considerável elevação, incrementada pela crescente urbanização, que atingiu 85% da população total do País (IBGE, 2010), cujas médias de geração per capita superam 1,2 kg/hab./dia, quantidade equivalente à verificada nos países desenvolvidos, e revela hábitos de consumo e descarte de cidades que ainda não refletiram políticas implementadas para reduzir o volume de resíduos (ABRELPE, 2010). Tal incremento se manifestou em todas as regiões geográficas, principalmente nas cidades com maior concentração populacional.

O aumento da geração de resíduos sólidos foi verificado por meio das sucessivas taxas de crescimento na última década (ABRELPE, 2008, 2011, 2015, 2016, 2017). Contudo, em estudo realizado em 2016, a ABRELPE demonstrou que, não obstante ter havido um crescimento populacional no país de 0,8% entre os anos 2015 e 2016, houve uma retração na geração per capita de RSU de 3%, com uma redução de 1,07 para 1,04 kg/hab./dia, enquanto que na geração total houve decréscimo de 2%, decaindo de 281.874 para 214.405 t/dia. Um dos fatores que pode ter causado a redução na geração dos resíduos sólidos urbano pode ter sido a crise econômica dos anos 2015 e 2016.

Os números da ABRELPE (2016), referentes à geração de RSU, revelam um total anual de, aproximadamente, 78,3 milhões de toneladas no país, dos quais 71,3 milhões de toneladas foram coletadas, representando 91%

do total de resíduos urbanos gerados, indicando que foram dispostos inadequadamente cerca de 7 milhões de toneladas.

Com relação à disposição final dos RSU coletados houve redução em 2016, se comparado ao índice do ano de 2015, tendo sido verificado um decréscimo de 58,7% para 58,4%, o que representa 41,7 milhões de toneladas enviadas para aterros sanitários. De um modo geral, o estudo apontou que 3.331 municípios brasileiros continuaram com a disposição inadequada dos seus resíduos, enviando mais de 29,7 milhões de toneladas ano, correspondentes a 41,6% do RSU coletado, para lixões ou aterros controlados, equipamentos que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações. (ABRELPE, 2016).

O referido estudo também demonstra que, possivelmente, com a crise econômica que caracterizou o ano de 2016, houve retração no consumo e geração de resíduos decorrente e, conseqüentemente, afetou indicadores como: recursos aplicados pelos municípios para os serviços de limpeza urbana e a geração de empregos diretos no setor, apresentando uma queda de 0,7% e 5,7, respectivamente, em relação a 2015.

Em 2017, os números referentes à geração de RSU revelam um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país (SNIS, 2017), com 1% a mais em relação a 2016, e a geração per capita de 1,035 Kg/hab./dia. Desse total gerado, foram coletados 71,6 milhões de toneladas, representando um percentual de cobertura de coleta de 91,2% para o país, revelando que deixaram de serem coletados 6,9 milhões de toneladas de resíduos que, conseqüentemente, tiveram destino impróprio.

A coleta seletiva ainda é incipiente, apresentando um percentual aproximado de 3%, existindo ações em 22% dos municípios brasileiros (SNIS, 2017).

No tocante à disposição final dos RSU, segundo a ABRELPE (2017), aproximadamente 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, está disposto em aterros sanitários. O restante, que corresponde a 40,9% dos resíduos coletados, foi despejado em locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, totalizando mais de 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados. Fator relevante é que apenas 46% dos municípios

brasileiros cobram taxas relativas aos serviços de RSU, valores que cobrem apenas 54% dos custos.

Segundo a ABRELPE (2019) os recursos aplicados pelos municípios em 2017 para fazer frente a todos os serviços de limpeza urbana no Brasil foram, em média, de R\$10,37 por habitante por mês. A geração de empregos diretos no setor de limpeza pública manteve-se estável, com ligeira variação de 0,3% em relação ao ano anterior, de 2016, e atingiu cerca de 340 mil postos de trabalho formal no setor. O mercado de limpeza urbana movimentou recursos correspondentes a R\$ 28,5 bilhões (ABRELPE, 2017).

2.4.2 A gestão de resíduos sólidos na Região Nordeste

A Região Nordeste é a terceira maior região do Brasil, com 1.561.177 km², uma população de 57.071.654 habitantes (IBGE, 2019) e densidade demográfica de 36,72 hab./km², composta por 09 Estados, quais sejam: Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Maranhão, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Contém 1.794 municípios, dos quais 186 pertencem a Pernambuco, onde a Região Metropolitana do Recife está inserida. Na RNE registrou-se situação semelhante à geração de RSU no Brasil, em 2016.

Segundo ABRELPE (2016), a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados foi de 55.056t/d, apresentando um decréscimo de 1,4% em relação a 2015, entretanto, se comparado ao aferido em 2011, esse número representa um acréscimo de 8% às 50.962t/d registradas naquele ano. Em 2017, houve um aumento na geração que passou para 55.492 t/dia. A geração per capita decaiu de 2,1%, apresentando os valores de 0,988, em 2015, e 0,967, em 2016, e em 2017 foi de 0,969 kg/hab./dia.

No que diz respeito à quantidade coletada de RSU, segundo o mesmo estudo, o índice de cobertura foi de 79%. Houve um aumento no número de municípios dotados de serviços de coleta seletiva, pois no ano de 2011 registrou-se que cerca de 40 % dos 1.794 municípios apresentaram serviços de coleta seletiva, enquanto no ano de 2016 essa porcentagem passou para 49,6%, com 889 municípios com alguma iniciativa de coleta seletiva, e em 2017 foi 902 (ABRELPE, 2016, 2017).

A destinação dos resíduos coletados, com o aumento na quantidade coletada, se refletiu em acréscimo em todos os tipos de destinação, alterando a proporção observada em 2011, de 35,3% dos RSU com destino a aterros sanitários, enquanto em 2016 esse índice foi de 35,6%. Em 2017, 79,1%, dos quais 64,6% foram para lixões e aterros controlados e 35,4 % disposto em aterro, tendo uma situação similar ao ano de 2016 (ABRELPE, 2016, 2017).

2.4.3 A gestão de resíduos sólidos em Pernambuco

No Estado de Pernambuco, de acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (SEMAS, 2012), cerca de 80% dos municípios destinavam seus RSU em lixões, ao passo que os demais, 20%, efetuam a destinação em aterros sanitários e aterros controlados. O índice apresentado em Pernambuco é melhor que o registrado para todo o Nordeste.

Na Tabela 5 apresentam-se os dados relativo à destinação dos resíduos em Pernambuco, tendo como referência o ano de 2012.

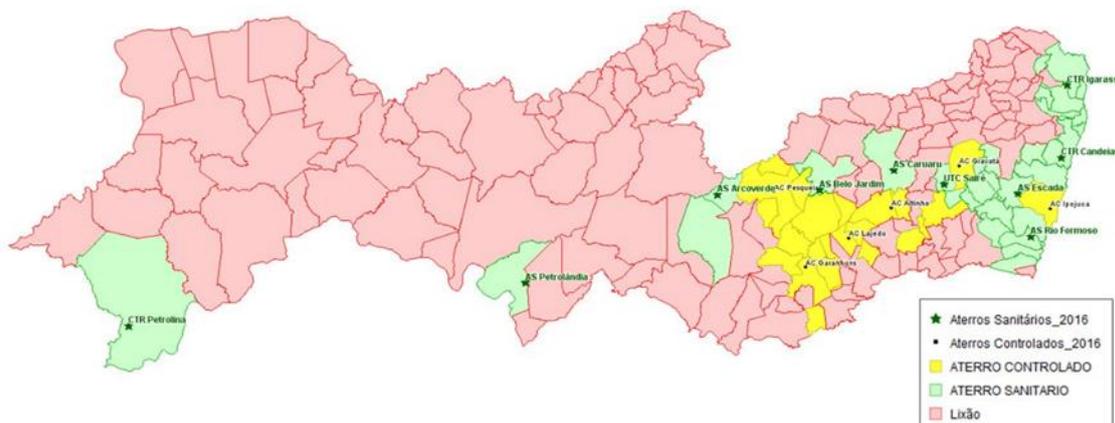
Tabela 5 - Destinação dos RSU em Pernambuco

Tipo de disposição	Por município		Por resíduos dispostos	
	Quantidade	%	t/ano	%
Aterro Sanitário	35	19,02	2.272	58,18
Aterro Controlado	02	1,08	111	2,85
Lixões	148	79,9	1.522	38,97
Total	184	100	3.905	100

Fonte: Adaptado de: Pernambuco (2012)

Em 2016, a destinação final dos resíduos sólidos do Estado de Pernambuco foi mapeada pelo Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE/PE), conforme pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Destino final dos resíduos sólidos no Estado de Pernambuco



Fonte: TCE/PE (2017)

Segundo o Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE/PE 2016), dos 184 municípios do estado, 126 fizeram disposição em lixões, 33 em aterros sanitários licenciados e 25 em aterros controlados, o que significa que 31,5% dos municípios dispuseram os RSU de forma inadequada.

Com relação à quantidade de resíduos dispostos, o estudo do TCE (2016) aponta que 54,8% dos resíduos dispostos foram depositados em aterros sanitários, representando um total de 5.736 t/dia de resíduos aterrado. A quantidade disposta em vazadouro a céu aberto é de 4.136 t/dia, o que representava ainda o percentual elevado de 39,5%. Os aterros controlados receberam 5%, equivalente a 595 t/dia de RSU.

Em 2018, o Relatório do Tribunal de Contas do Estado (TCE, 2019) registra que 78 dos 184 municípios pernambucanos depositaram corretamente os resíduos em locais ambientalmente adequados, correspondendo a 63,4 % dos resíduos gerados, que totaliza 6.057 t/dia (TCE, 2019). O avanço observado pelo TCE resulta da disposição adequada na RMR, que é responsável por aproximadamente 60% dos resíduos gerados no Estado, dos quais aproximadamente 87% têm destinação adequada (TCE, 2019).

Por outro lado, os 104 municípios restantes fazem a disposição inadequada, depositando os RSU em lixões a céu aberto e 02 em aterros controlados, que perfaz um montante de 3.364 t/dia de resíduos que necessitam de tratamento (TCE, 2019).

Comparando-se os dados obtidos em 2012 no Plano Estadual de Resíduos Sólidos e os publicados em 2016 e 2018 pelo Tribunal de Contas do

Estado (Tabela 6), verifica-se que houve um acréscimo de 63% na quantidade total de resíduos dispostos no período de 2012 a 2016, correspondente a um aumento de 3.905 para 10.467 toneladas/ano e, em 2018, uma redução para 9.615.

Tabela 6 - Comparação dos resíduos disposto nos anos de 2012, 2016 e 2018, no estado de Pernambuco

Tipo de disposição	Município			Resíduos dispostos –t/ano		
	2012	2016	2018	2012	2016	2018
Aterro Sanitário	35	33	78	2.272	5.736	6.057
Aterro Controlado	02	25	02	111	595	194
Lixões	148	126	104	1.522	4.136	3.364
Total	184	184	184	3.905	10.467	9.615

Fonte: Adaptada de: Pernambuco (2012) e TCE, (2017 e 2019)

Também no período de 2012 a 2016, foi observado que apesar de haver uma redução no número de municípios com disposição em aterros sanitários (2 municípios deixaram de dispor ou operar adequadamente o aterro), a quantidade de resíduos dispostos aumentou de 2.272 para 5.736 t/ano (Tabela 6). E, ainda, em 2016 o avanço na gestão dos RSU refletiu na redução de 148 para 126 municípios dispendo em lixão e um aumento de 02 para 25 municípios que dispõem em aterro controlado, seja pelo encerramento dos lixões ou pela transformação dos mesmos em aterros controlados. O incremento pode ter se dado devido ao aumento populacional no período estudado, e a redução da quantidade de resíduos pode estar associada a variação de consumo com a crise econômica, a partir de 2015, quando houve a queda no poder aquisitivo, com redução do produto interno estadual.

De uma maneira geral, no período de 2012 a 2018 houve um decréscimo de 148 para 104 municípios com disposição em lixões e o aumento de 35 para 78 com disposição em aterros sanitários, o que demonstra um avanço na gestão dos resíduos sólidos em Pernambuco. Entretanto, existe a necessidade de ações mais efetivas para o encerramento dos lixões, assim como para a recuperação das áreas degradáveis, com a remediação dos lixões, que representam um grande passivo ambiental.

2.5 GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

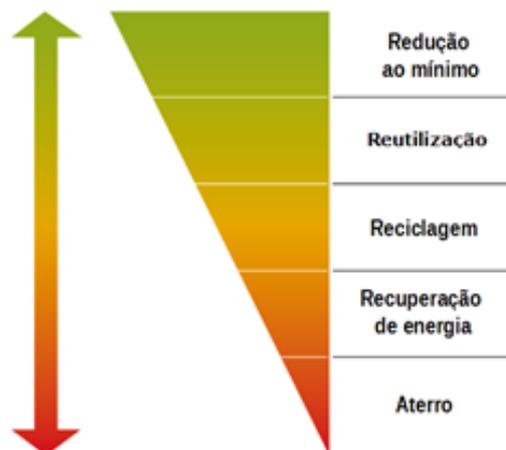
Priorizar e envidar esforços para o planejamento das ações para uma gestão integrada dos resíduos sólidos é urgente em função da problemática de saúde ambiental dos municípios. Esta última está relacionada com a deficiência ou com a ausência de serviços públicos de saneamento ambiental e do enfretamento das mudanças climáticas.

A Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007) instituiu a Política Nacional de Saneamento (PNS), trazendo uma mudança de paradigma, quando instituiu que a abrangência da questão do saneamento ambiental vai além do tratamento de esgoto, abastecimento de água e drenagem de águas pluviais, incluindo a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos. Destaca, ainda, como limpeza urbana um conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destino final dos resíduos sólidos urbano (RSU) (Brasil, 2007). Por sua vez, a PNRS traz a concepção de gestão integrada de resíduos sólidos, definindo-a como: “um conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável” (BRASIL, 2010).

A gestão integrada é um conceito utilizado na (PNRS) e orienta tanto o manejo dos resíduos sólidos quanto as estimativas dos gases de efeito estufa.

Aspecto relevante na gestão integrada de resíduos sólidos é a hierarquização das ações, que minimizam impactos socioambientais, cuja ordem de priorização é: a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e disposição final. (Figura 11).

Figura 11 - Hierarquização da gestão integrada de RSU



Fonte: Extraído: GIZ (2017)

2.5.1 Classificação e caracterização dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos podem ser classificados e caracterizados quanto à periculosidade, à origem e às propriedades físicas, químicas e biológicas.

As características físicas e químicas dos resíduos são fundamentais para projetar, dimensionar as unidades de tratamento, planejar as etapas de um sistema de gerenciamento e estimar os gases de efeito estufa (GEE), conforme caracterizadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Características físico-químicas dos resíduos e sua importância

Características	Descrição	Importância
Geração per capita (kg/hab./dia)	Quantidade diária de resíduos gerados por habitante.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Projeção da quantidade de resíduos; ✓ Dimensionamento das unidades do sistema de manejo.
Teor de umidade (%)	Percentual (em massa) de água em uma amostra de RSU.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Influencia na velocidade de degradação aeróbia ou anaeróbia e no processo de incineração.
Composição gravimétrica (%)	Percentual de cada componente em relação à massa total de resíduos.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Definição das frações dos materiais recicláveis e do potencial para a compostagem. ✓ Estimativas das emissões de gases de efeito estufa.
Massa específica aparente (kg/m ³)	Relação entre a massa do resíduo, não compactado, em relação ao volume que ocupa.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dimensionamento de projetos de aterro sanitário, de equipamentos e veículos de coleta.
Compressividade	Grau de compactação ou redução de volume que uma massa de resíduo sofre sob pressão.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Definição da vida útil do aterro sanitário ✓ Dimensionamento de equipamentos, veículos de coleta.

Características	Descrição	Importância
Relação Carbono /Nitrogênio (C/N)	Grau de decomposição da massa de RSU.	✓ Estabelecimento da qualidade do composto produzido. (continua)
Poder Calorífico (kcal/kg)	Energia (calor) que uma massa de RSU desprender ao ser submetida a um processo térmico.	✓ Dimensionamento das instalações dos processos de tratamento térmico (incineração, pirólise, outros).
pH	Teor de acidez, neutralidade ou alcalinidade do ambiente da massa de resíduos.	✓ Desenvolvimento dos microrganismos. ✓ Definição da tecnologia de tratamento.
Composição química	Teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral e gorduras.	✓ Definição da tecnologia a ser utilizada para tratamento. ✓ Influencia principalmente os processos biológicos.

Fonte: Adaptado de MERSONI (2015)

2.5.2 Etapas do gerenciamento de resíduos sólidos e relação com emissões de GEE

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos envolve, além da não geração, a redução na geração, reutilização e reciclagem, as seguintes etapas (Brasil, 2008):

- a) acondicionamento;
- b) coleta e Transporte;
- c) limpeza dos logradouros;
- d) tratamento final ambientalmente adequado dos resíduos;
- e) disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

A redução na geração dos resíduos em geral, a reutilização e a reciclagem, proporciona a modificação dos padrões de consumo e contribui, significativamente, para reduzir o consumo de energia, o uso de matérias-primas e dos recursos naturais, do envio apenas de rejeito para os aterros, como preconiza a legislação pertinente, além de mitigar as emissões de GEE pela redução da geração de gás metano.

O acondicionamento dos resíduos é uma etapa fundamental, devendo ocorrer desde a fonte geradora, precedendo a coleta.

O sistema de coleta, seja convencional e/ou diferenciado, é fundamental para a meta de disposição final de rejeitos e redução da geração dos gases de efeito estufa. A coleta diferenciada ou seletiva constitui na segregação prévia dos RSU, de acordo com a sua constituição ou composição.

Segundo o Manual “ Elementos para a organização da coleta seletiva e projetos de galpões” (BRASIL, 2008), para que um sistema de coleta seletiva seja eficiente, alguns passos importantes e básicos deverão ser considerados:

- a) setorização do município/cidade para definição da coleta seletiva;
- b) planejamento da logística de coleta;
- c) mobilização social e educação ambiental;
- d) inclusão dos catadores de materiais recicláveis;
- e) instalação de unidades de triagem e pontos de entrega voluntária;
- f) estruturação gerencial de apoio às cooperativas/associações de catadores de materiais reciclados.

2.5.3 Sistemas de tratamentos

O tratamento de resíduos sólidos urbanos pode ser compreendido como um conjunto de procedimentos físicos, químicos e biológicos, que têm como objetivo diminuir a carga poluidora ao meio ambiente e reduzir os impactos sanitários, além de visar o beneficiamento econômico dos resíduos (JUCÁ *et al*, 2014). No Quadro 4 apresentam-se formas de tratamento de RSU.

Quadro 4 - Formas de tratamento, processo, evolução e inovação

Sistema Básico	Processos	Evolução	Produtos	Inovação
Triagem	Físico	Coleta seletiva, Tratamento mecânico biológico (TBM).	Matéria-Prima para Reciclagem, Energia.	Recuperação dos resíduos, Energia derivada dos resíduos.
Tratamento Biológico	Biológico	Biodigestores anaeróbios, Compostagem.	Composto orgânico, Energia.	Agricultura, Energia derivada dos resíduos.
Tratamento Térmico	Físico-químicos	Incineração, Gaseificação, Pirólise.	Energia elétrica, Vapor.	Energia derivada dos resíduos.
Aterros Sanitários	Físico, Químicos e Biológicos.	Reator anaeróbico, Tratamento da matéria orgânica	Biogás, Lixiviado.	Energia derivada dos resíduos, Fertilizantes.

Fonte: Adaptado de JUCÁ *et al*. (2014)

Tecnologias e suas potenciais influências nas emissões de GGE, bem como possibilidades de redução e de mitigação para enfrentamento das mudanças climáticas, podem ser observadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Tecnologias de tratamento, influência nas emissões de GEE e Mitigação

Tecnologias de tratamento/destinação final	Fonte de emissões e potenciais impactos	Possibilidades de mitigação
Aterro sanitário	Emissões de CH ₄ e CO ₂ pela decomposição de RSU. Maior fonte de CH ₄ do setor de RSU para o aquecimento global.	<ul style="list-style-type: none"> • A captura e queima dos gases para emitir apenas o CO₂. • Aproveitamento energético (energia elétrica ou térmica).
Tratamento térmico	Emissões de CO ₂ e NO ₂ pela combustão.	<ul style="list-style-type: none"> • Incineração - geração de energia, evitando emissões de GEE. • Gaseificação e a Pirólise emitem menos GEE
Tratamento mecânico biológico – TMB	Emissões associadas à energia utilizada para a operação do processo.	<ul style="list-style-type: none"> • Aproveitamento do biogás da fração orgânica, como fonte de energia. • Otimização do processo.
Compostagem	É um processo potencial de sequestro de carbono. Pode ocorrer emissão indireta associada à energia do processo.	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas fechados, com filtro de ar. • Utilização do Composto orgânico como fertilizante reduzindo as emissões do setor agrícola.
Digestão anaeróbica	Se ocorrer emissões, estão associadas a vazamento, emissões fugitivas de CH ₄ e energia na operação do sistema.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização do biogás como combustível para operação do sistema. • Sistema autossustentável.
Reciclagem	Potencial para redução das emissões de GGE da disposição dos RSU	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento da cadeia produtiva dos recicláveis. • Redução do uso dos recursos naturais e de matéria – prima.

Fonte: Adaptado de ProteGEEr (2017)

A compostagem é um processo microbiológico aeróbio e controlado de transformação de resíduos orgânicos em matéria estabilizada (BIDONE, 1999). A matéria estabilizada, como produto final do processo, compõe-se de compostos orgânicos e pode ser utilizada como adubo ou fertilizante.

No contexto brasileiro, a compostagem tem grande importância na destinação final de resíduos, uma vez que cerca de 50% do RSU municipal é constituído por matéria orgânica, no entanto ainda é insipiente a sua utilização.

Dentre as vantagens apresentadas pela compostagem, destacam-se: o potencial de redução de RSU municipal destinado ao aterro sanitário; aproveitamento agrícola da matéria orgânica; reciclagem de nutrientes para o solo; processo ambientalmente seguro; eliminação de patógenos; economia no tratamento de efluentes; e como agente de mitigação das mudanças climáticas com a redução dos gases de efeito estufa (IPT/CEMPRE, 2010).

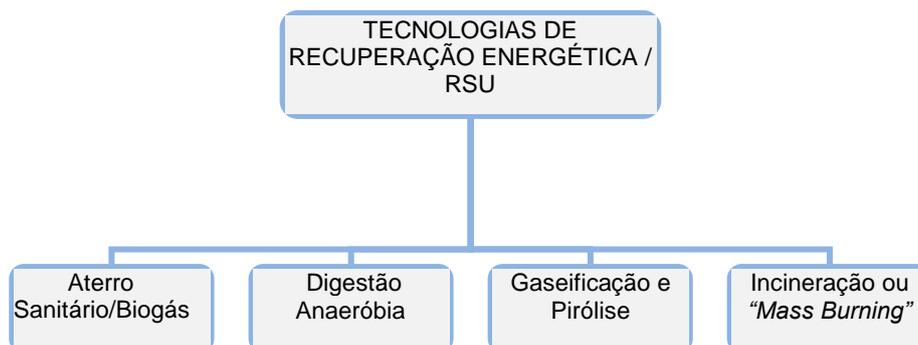
A recuperação ou valorização energética é utilizado para denominar os métodos e processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos RSU. Consiste em alternativas técnicas e viáveis que utilizam o processo de aproveitamento do poder calorífico, contido nos resíduos, para gerar energia elétrica e térmica utilizada como combustível. Podem ser considerados processos eficazes no que diz respeito aos benefícios ambientais decorrentes do menor volume de resíduos disposto em aterros sanitários e diminuição de gases do efeito estufa. E, ainda, contribuem para o desenvolvimento sustentável, aliado aos benefícios econômicos (PERNAMBUCO, 2014).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos considera a recuperação e o aproveitamento energético como destinação final dos resíduos sólidos urbanos, conforme disposto no Art. 3º:

Destinação Final Ambientalmente Adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (inciso VII) (BRASIL, 2010).

As principais alternativas tecnológicas para recuperação energética dos RSU são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Alternativas tecnológicas aplicáveis à recuperação energética a partir de RSU



Fonte: Adaptado de CETESB (2010)

Aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, com a finalidade de disposição MARIANO (2008), que consiste na compactação dos resíduos no solo, dispondo-os em camadas, que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, formando células, de modo a se ter uma alternância entre os resíduos e o material de cobertura.

Os aterro sanitários, além de ser o local da disposição final dos resíduos sólidos urbanos, pode ser considerado uma tecnologia de tratamento de digestão anaeróbia, em função dos processos físicos, químicos e microbiológicos que ocorrem no interior dos mesmos, com a geração de biogás (JUCÁ *et al.*, 2013).

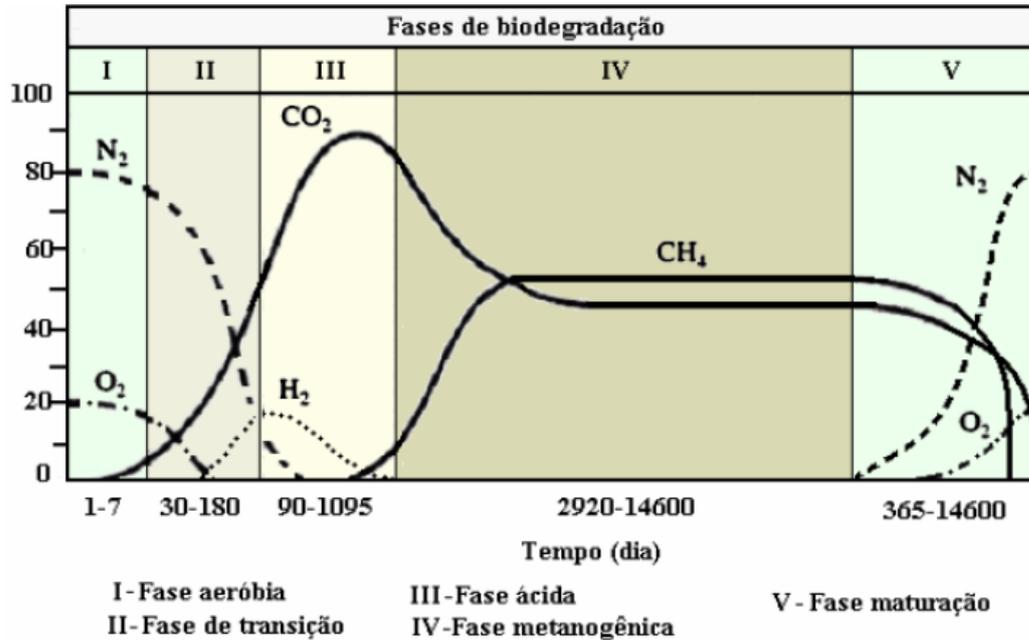
A disposição de RSU em aterros sanitários, além da geração do biogás, resulta no subproduto chorume, que com a umidade dos resíduos, ou por infiltração, resulta na produção de lixiviado, que carrega os materiais dissolvidos e suspensos presentes nos resíduos (SÁ *et al.*, 2012). O lixiviado deve ser drenado e tratado.

A drenagem do biogás tem a principal função de conduzir os gases gerados pela decomposição dos resíduos sólidos para drenos, evitando migrações para o subsolo e atmosfera, que pode causar possíveis incêndios e explosões. Os gases coletados podem ser queimados ou transformados em biogás.

O período entre a deposição de resíduos sólidos e a produção completa dos gases, e em especial do CH₄, principal gás, é quimicamente complexo e envolve sucessivas reações microbianas.

A Figura 13 representa as fases de biodigestão a partir da degradação da matéria orgânica em um aterro sanitário.

Figura 13 - Fases de biodegradação da matéria orgânica em aterro sanitário



Fonte: TCHOBOGLOUS *et al.* (1993)

As diversas fases da biodigestão estão descritas na literatura (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993; ENSINAS, 2003; FIRMO, 2008; PAZ, 2014; MARIANO, 2008): que destacam a composição dos RSU, a umidade, a temperatura e valores de pH como principais fatores que atuam sobre o processo, assim como a disponibilidade e tipo de microrganismos e a presença de agentes inibidores.

O biogás proveniente do processo de decomposição dos RSU encaminhados aos aterros sanitários, tem como principal componente o metano, que pode ser utilizado para geração elétrica e térmica.

O sistema de coleta e extração do biogás em aterros deve possuir infraestrutura adequada, onde o biogás é captado através de drenos verticais e/ou horizontais e conduzido a um sistema gerador utilizado para a conversão energética (MACIEL, 2009).

A energia captada pode ser utilizada pelo próprio aterro como iluminação do local, e dependendo da quantidade, a energia pode ser até comercializada e introduzida no sistema de distribuição.

No Quadro 6 estão apresentadas as principais vantagens do reaproveitamento energético a partir da captação do biogás de aterros sanitários.

Quadro 6 - Vantagem do aproveitamento energético a partir da captação do Biogás

Econômica	Ambiental	Social
Comercialização da energia captada/venda de energia elétrica à rede ou energia térmica.	Redução das emissões de gás metano para a atmosfera.	Geração de empregos e redução de subempregos
Colaboração para a viabilidade econômica do tratamento do RSU.	Redução do consumo de combustíveis fósseis, principais responsáveis pelo aumento do efeito estufa.	Geração descentralizada e próxima aos pontos de carga, a partir de uma fonte renovável.
Melhor gerenciamento das instalações de saneamento.	Redução na geração de odor nas vizinhanças, de chorume e de contaminação do lençol freático.	Colaboração para a viabilidade econômica do saneamento básico. Menor rejeição social.
Redução na quantidade de eletricidade comprada da concessionária.	Melhoria nas condições dos locais de disposição dos resíduos.	Redução dos custos da energia.

Fonte: Adaptado de CEMBio (2008)

Por outro lado, a digestão anaeróbia é um processo biológico que decompõe o resíduo orgânico, produzindo biogás.

Segundo FERREIRA (2015) o tratamento biológico é realizado via a metanização, que consiste em um sistema integrado com conversão de biomassa residual em bioenergia, com a valorização dos subprodutos gerados o biogás e o bio sólidos.

SANTOS *et al.* (2020) acrescenta que a digestão anaeróbia é uma alternativa, visto que parte dos resíduos pode ser utilizado para geração de energia renovável, e parte para produção de biofertilizantes.

Segundo OLIVEIRA (2018), a digestão anaeróbia, como tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos e semi-sólidos e produção de metano, é uma tecnologia utilizada em todo o mundo.

No Brasil, a tecnologia de metanização ainda é pouco explorada e a recuperação energética de biogás ocorre de maneira bastante incipiente (FERREIRA, 2015), mas tem avançado.

O biogás, produto do processo de digestão anaeróbica, é uma mistura de gases, principalmente o metano (CH_4), o gás carbônico (CO_2), o hidrogênio (H_2) e o gás sulfídrico (H_2S). O CH_4 representa em média 50-90% do volume total dessa mistura, enquanto o CO_2 corresponde a 5-10% e é o principal responsável pelo GEE (SEEG, 2017, BANCO MUNDIAL, 2010).

A gaseificação é a conversão do combustível sólido, através de processos termoquímicos, para obtenção de gás de síntese e posterior aproveitamento energético. A transformação térmica dos resíduos sólidos é determinada sob uma quantidade limitada de oxigênio (GIZ, 2017a).

A pirólise também utiliza processo termoquímico para degradar os materiais sólidos, porém praticamente sem a presença de oxigênio, que evita a combustão e resulta em gás, óleo combustível e resíduos sólidos carbonizados. (GIZ, 2017a).

Para ambos os processos não existem, no Brasil, plantas em operação para resíduos sólidos urbanos, ocorrendo em processos industriais específicos.

A Incineração, tecnologia conhecida como “Mass Burning”, é um tratamento térmico a partir da queima em temperaturas acima de $800\text{ }^\circ\text{C}$ dos RSU, que gera energia elétrica ou vapor d’água. Todo o processo de incineração deve atender às normas estabelecidas pela legislação ambiental, principalmente no que se refere aos limites de emissões atmosféricas. Esse processo tem a capacidade de redução acentuada do peso (até 70%) e do volume (até 90%) dos resíduos através de combustão controlada, com monitoramento permanente, visando à disposição final do rejeito remanescente em aterro sanitário (GIZ, 2017a; JUCÁ *et al.*, 2013).

No Brasil, é insignificante o nível de tratamento de RSU através da incineração, sendo, no entanto, utilizada para os resíduos industriais e dos serviços de saúde.

O Combustível Derivado de resíduos (CDR) é produzido em instalações de unidade de preparação para a remoção dos componentes indesejáveis dos resíduos, como os metais, por exemplo, a partir de operações de tratamento mecânico de trituração dos resíduos não perigosos, com valor energético, (JUCÁ *et al.*, 2013) e faz parte da Instrução Normativa N° 13/2012 do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA, 2012).

Na produção do (CDR) usualmente são utilizados resíduos oriundos dos setores privado (indústria, comércio e serviço) e público (parcela seca segregada do RSU), gerados como rejeito dos processos de segregação/triagem, que ao invés de serem enviados para aterros sanitários, tais refugos são submetidos ao processo de valorização, visando à obtenção de um material com característica homogênea (GIZ, 2017a; JUCÁ *et al.*, 2013).

Segundo GIZ (2017a), coprocessamento é a utilização de materiais derivados de resíduos, denominados de combustíveis derivados de resíduos (CDR) para substituir recursos naturais minerais (reciclagem de materiais) e/ou combustíveis fósseis tradicionais como carvão, óleo combustível e gás natural (recuperação de energia) em processos industriais.

O coprocessamento é aplicado principalmente nas unidades industriais que necessitem de combustível para queima, como a indústria de cimento, em usinas termelétricas, e em menor escala de cal e aço.

2.5.4 Modelos de geração de biogás

Modelos para a estimativas da geração do biogás têm sido estudados, tendo em vista ser o biogás uma fonte de energia renovável que, se aproveitado e/ou tratado adequadamente, pode oferecer diversos incentivos econômicos, ambientais e tecnológicos.

Segundo FIRMO (2013), existem vários modelos matemáticos para estimar a geração de biogás em aterros sanitários, que são classificados em biocinéticos e globais. A diferença entre eles é que as equações matemáticas que representam os modelos biocinéticos são mais complexas, visto que requerem, além das equações gerais e construtivas para determinação da geração de gás, outros fatores como fluxo de gás e líquidos, heterogeneidade dos materiais, mecânica, comportamento, decomposição microbiana, pH e temperatura, sendo, também, influenciada por fatores externos como a pressão atmosférica e outras condições climáticas. Enquanto que os modelos globais consistem em equações simplificadas que agrupam os fenômenos da degradação em equações exponenciais estimando a geração de gás em função do tempo e de parâmetros experimentais de calibração, em especial o potencial de geração e a taxa de decaimento constante.

A geração depende das fases de decomposição dos resíduos, ocorrendo na última, em função do tempo de disposição e dos fatores associados ao processo de degradação, tais como: composição dos resíduos, clima e outros.

FIRMO (2013) desenvolveu estudo usando dois modelos globais o US-EPA (2015) e IPCC (2006) para estimar a geração de metano em uma célula experimental, com preenchimento durante 10 meses no aterro controlado da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes/PE/Brasil. Os resultados estimados pelos modelos, forma comparados com os obtidos experimentalmente nos testes de decomposição, composição do biogás e do metano, realizados semanalmente durante o monitoramento.

Os parâmetros de entrada do modelo do IPCC (2006), para a estimativa de geração de gás metano foram, para o MCF – fator de correção do metano 0,9, DOCf – fator da fração de carbono 0,798 e F – concentração de metano 50%.

Os dados recomendados, default e otimizados utilizados para DOC – fração degradável do carbono orgânico e k - constante de degradação, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados de entrada do modelo do IPCC 2006 no experimento

Componentes	Faixa Recomendada		Default		Otimizado	
	COD	K	COD	K	COD	K
Matéria orgânica	0,08-0,20	0,17 – 0,70	0,15	0,40	0,15	1,4
Papel/papelão	0,36-0,45	0,06 – 0,085	0,40	0,07	0,36	0,10
Madeira	0,39-0,45	0,035 – 0,05	0,43	0,035	0,39	0,05
Sanitários	0,18-0,32	0,15 – 0,20	0,24	0,17	0,18	0,20
Têxteis	0,20-0,40	0,06 – 0,085	0,21	0,07	0,20	0,085

Fonte: FIRMO (2013)

Como resultado do experimento, foi observado que o modelo do IPCC (2006) representou o melhor comportamento da geração de metano no aterro experimental do que o modelo US/EPA (2015).

Segundo FIRMO (2013), o erro relativo obtido entre os dados otimizados no experimento em aterro da RMR e os default do IPCC (2006) foi de 12,6%. Erro aceitável, se comparado com os resultados obtidos de 18% por Oonk *et al.*

(1994), utilizando o modelo de primeira ordem multicomponente em 08 aterros de RSU na Holanda, e com Ogor & Guerbois (2005), que afirmaram que não foi possível obter estimativas com erros relativos inferiores a 10%, mesmo com a otimização dos parâmetros, em experimento em 05 aterros sanitários da França.

2.5.5 Formas inadequadas de disposição de resíduos

Basicamente, existem duas formas de disposição inadequada de resíduos: os aterros controlados no qual os resíduos são dispostos sem todos os requisitos dos aterros sanitários e os lixões que recebem os resíduos a céu aberto sem nenhum controle.

O aterro controlado foi definido pela NBR (1985) como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos sem causar danos ou risco à saúde e sua segurança, minimizando os impactos ambientais, podendo ser considerado uma solução intermediária entre o lixão e o aterro sanitário. Muitas vezes é o processo de transformação dos lixões em aterros, minimizando os impactos ambientais associados ao acúmulo de resíduos em áreas sem nenhum tipo de tratamento.

O aterro controlado utiliza técnicas da engenharia para isolar os resíduos descartados, como impermeabilização, cobertura com argila e compactação, no entanto, na maioria das vezes não tem sistema de tratamento do Chorume ou o controle das emissões dos gases.

De acordo com a NBR (1989), lixão é uma forma inadequada de disposição final dos resíduos sólidos, caracterizado pela simples descarga sobre o solo, sem nenhuma medida de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

Assim, os primeiros depósitos de resíduos sólidos foram criados sem nenhum tipo de controle, seja ambiental, econômico ou social, sendo chamado de lixões (FIRMO, 2009). São áreas órfãs, que recebem resíduos a céu aberto sem caracterização em termo de quantitativa e de composição e, na maioria das vezes, com a presença de catadores, que sobrevivem dos materiais coletados.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012) contempla diretrizes para implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), trata da eliminação dos lixões e aterros controlados, da recuperação das áreas degradadas e da redução da disposição de RSU em aterro sanitário, definindo metas com base na caracterização nacional em 2013, para matérias recicláveis e para compostagem. Na Tabela 8 estão indicadas as metas a serem alcançadas em 2015, 2019 e 2031 para atingir a PNRS.

Tabela 8 - Metas a serem alcançadas para atingir PNRS

Região	% Recicláveis secos			% Recicláveis úmidos –Matéria orgânica		
	2015	2019	20131	2015	2019	2031
Brasil	22	28	45	19	28	53
Norte	10	13	20	10	20	50
Nordeste	12	16	25	15	20	50
Sul	43	50	60	30	40	60
Sudeste	30	37	50	25	35	55
Centro – Oeste	13	15	25	15	25	50

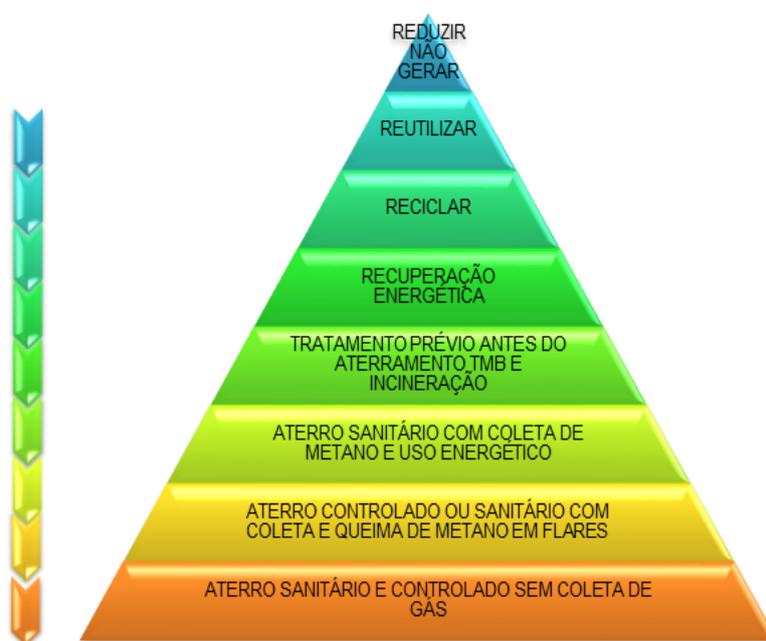
Fonte: Adaptada de BRASIL (2012)

Pelas metas definidas a serem alcançadas para atingir PNRS, para os materiais recicláveis o Nordeste deveria obter 16% em 2019, e em 2031, 25%. Para matéria orgânica, em 2019, 20%, e 50 % em 2031, entretanto verifica-se que as metas de 2015 não foram obtidas.

De acordo com o IPCC (2000), a concentração de gases metano gerados pela mesma quantidade de resíduos em um aterro sanitário seria reduzida em 80% em um aterro sem manejo de 5 metros de profundidade, e em 40% em outro, com menos de 5 metros de profundidade, o que significa que os aterros sanitários geram mais gases do que os lixões ou mesmo aterro controlado, e quando melhor a gestão de RSU, maior a quantidade de gás gerada, o que significa maior a necessidade de mitigar as emissões pelos gases gerados. (Figura 14).

Ressalte-se que apesar dos lixões gerarem menos gases do que os aterros sanitários, com menos contribuição para as emissões de GGE, os impactos ambientais causados pelos lixões são sem dúvida muitas vezes maiores do que os dos aterros sanitários.

Figura 14 - Aumento de emissões de GEE em função da destinação de RSU



Fonte: Adaptado de GIZ (2017)

PAZ *et al.* (2015) afirma que a queima pura e simples em *flares* do metano tem efeito positivo em reverter a contribuição antropogênicas nas mudanças climáticas.

Segundo FELIPETTO (2007), um flare tem uma eficiência de 98% na queima de CH_4 , isto é, na massa que é oxidada a CO_2 .

Dentro das atividades do Projeto ProteGEEr/GIZ/MMA/MDR, Cooperação entre Brasil – Alemanha/GIZ para a Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos, foi realizado estudo conjuntamente com a ATEPE/Grupo de Resíduos Sólidos/UFPE, visando assessorar o Governo Federal, em especial o Ministério das Cidades e o Ministério de Meio Ambiente, para a inclusão da redução de gases de efeito estufa - GEE na revisão do Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab.

O Estudo da ATEPE/GRS/GIZ (2018) indica a expectativa de redução de emissões de GEE conforme tipologia e infraestrutura utilizada para captação, tratamento, queima e aproveitamento do biogás gerado, cujos percentuais estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Processo de tratamento do biogás e expectativas de redução de Emissões

Evolução dos processos de tratamento	Expectativa de redução de emissões GEE%
Aterros sanitários convencionais com queima individual em flare	25
Aterros sanitários com queima centralizada, com extração forçada	50
Aterros sanitários com captação do gás para fins energéticos (energia elétrica e biocombustíveis)	75
Aterros sustentáveis energéticos, projetados e operados visando o aproveitamento do gás	90

Fonte: ATEPE/GRS/UFPE/GIZ (2018)

Os percentuais das expectativas de redução das emissões, em função da evolução dos processos de tratamento do biogás (ATEPE/GRS/UFPE/GIZ, 2018), foram tomados com referências para os cenários de mitigação dos gases de efeito estufa na RMR.

Em 2018, também, para dar suporte ao Governo Federal, na formulação de políticas para o setor de resíduos sólidos e clima de forma integrada, no âmbito do Projeto ProteGEEr/GIZ/MMA/MDR, foi realizada análise crítica sobre o alcance das metas previstas no PNRS e o cumprimento da NDC brasileira junto à comunidade internacional (METHANUS, 2018).

No estudo, foram definidos cenários com políticas isoladas e integradas como medida de mitigação e ficou evidenciado que as diferenças entre as emissões de 2005, apresentadas no Segundo Inventário e atualizado no Terceiro Inventário, com métricas distinta do PWG de 25 e 28, respectivamente, em si, daria um aumento de cerca de 25%, implicando num acréscimo significativo no montante do metano a ser evitado ou abatido (METHANUS, 2018).

No contexto do estudo demonstra-se que só a integração das políticas com efeito de curto e médio prazo, como a recuperação de metano e redução no aterramento, possibilitaria o atingimento das metas assumidas no Protocolo de Quioto.

2.6 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O IPCC

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) define mudança climática como “qualquer mudança no clima ao longo do tempo, quer devido a variabilidade natural ou como resultado da atividade humana.”. As mudanças climáticas impactam e aumentam a vulnerabilidade dos ecossistemas, recursos hídricos, segurança alimentar, assentamentos, sociedade e saúde humana (IPCC, 2014).

De todos os desafios ambientais aquele que hoje preocupa, reúne meios e esforços e representa campo de interesse da sociedade de um modo geral é a questão das mudanças climáticas (CAMPO, 2014), principalmente pela necessidade do equacionamento das intervenções humana que se manifesta através das emissões dos gases de efeito estufa.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) foi estabelecido em 1988, como órgão internacional de avaliação científica relacionada à mudança climática, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), por meio do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA ou UNEP sigla em inglês) (MCTI, 2010). Sua função é fornecer aos formuladores de políticas públicas avaliações periódicas sobre as mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros, opções de adaptação e mitigação (IPCC, 2010). As avaliações do IPCC fornecem uma base científica para que os governos em todos os níveis desenvolvam políticas relacionadas às mudanças climáticas que atendam às negociações na Conferência das Nações Unidas sobre o Clima, a Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC).

O Painel, composto por representantes dos Estados membros, reúne-se em Sessões Plenárias para tomadas de importantes decisões. O Gabinete do IPCC, eleito pelos governos membros, fornece orientações ao Painel sobre aspectos científicos e aconselha sobre gestão relacionada e questões estratégicas. A participação no IPCC é aberta a todos os países membros da OMM e das Nações Unidas. Atualmente tem 195 membros (MCTI, 2014).

O IPCC é organizado em 3 grupos de trabalho e uma força-tarefa, cuja responsabilidade está assim dividida:

- a) grupo de trabalho I - trata da "Base de Ciências Físicas da Mudança Climática";
- b) grupo de trabalho II - compete as análises dos "Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade das Mudanças Climáticas";
- c) grupo de trabalho III -é responsável pelos estudos de "Mitigação das Mudanças Climáticas";
- d) força-tarefa (TFI) - responsável pelos Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, cujo objetivo é desenvolver e aperfeiçoar uma metodologia para o cálculo e divulgação de emissões e remoções nacionais de gases de efeito estufa.

A Força -Tarefa sobre Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (TFI sigla em inglês) foi criada pelo IPCC para supervisionar o Programa Nacional de Inventários de Gases de Efeito Estufa do IPCC (IPCC-NGGIP). A atividade principal é desenvolver e refinar uma metodologia e software internacionalmente acordados para o cálculo e divulgação de emissões e remoções nacionais de GEE e para incentivar a sua utilização pelos países que participam no IPCC e por partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) (IPCC, 2006).

A TFI elabora relatórios de metodologia que fornecem diretrizes práticas para a preparação de inventários de gases de efeito estufa no âmbito da UNFCCC, regidos pelos princípios da transparência, da integralidade, da consistência, da comparabilidade e da exatidão.

Segundo (IPCC, 2006), as principais diretrizes metodológicas para a elaboração dos inventários de GEE são:

- a) Guia para Inventários de Gases de Efeito Estufa Nacionais (IPCC, 1996), revisada, publicada em 1987. No qual estão definidas as primeiras metodologias aceitas internacionalmente e utilizadas pelos países para estimar e reportar as emissões e remoções de GEE. Constando a abrangência do inventário nacional em termos de gases e categorias de emissão por fonte e remoções por sumidouros;
- b) Guia de Boas Práticas de Gerenciamento de Incertezas nos Inventários Nacionais (GPG, 2000). No qual constam as lições aprendidas a partir de diversos reportes e define ajustes à metodologia com a introdução de

- mecanismos de controle e garantia de qualidade, incluindo estimativas de incerteza dos resultados;
- c) Guia de Boas Práticas para Uso do Solo, Mudanças no Uso do Solo e Floresta (IPCC, 2000). No qual são apresentadas as lições aprendidas a partir de diversos reportes em que se definem novos ajustes à metodologia com o aperfeiçoamento de mecanismos de controle e garantia de qualidade, incluindo estimativas de incerteza dos resultados;
 - d) Guia para inventário de gases de Efeito Estufa Nacional (IPCC, 2006). A metodologia foi aprimorada e foram acrescentadas as orientações para a estimativa das emissões para os setores da economia.

O IPCC realizou cinco ciclos de avaliação desde a sua criação, em 1986 (MCTI, 2017).

Em 2018 entrou no sexto ciclo durante o qual o Painel produzirá três Relatórios Especiais, um Relatório de Metodologia sobre inventários nacionais de gases de efeito estufa e o Sexto Relatório de Avaliação (AR6).

Em outubro 2018 foi publicado o “Relatório Especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas sobre o Aquecimento Global de 1,5 °C” (IPCC, 2018) para orientar a tomada de decisões dos governos no aprimoramento de seus compromissos climáticos nacionais em relação às NDCs nacionais do Acordo de Paris. No relatório fica evidenciado que o aquecimento global induzido pela humanidade atingiu em 2017 aproximadamente $1 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ acima dos níveis pré-industriais, e atualmente segue aumentando $0,2 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ a cada década (IPCC, 2018) .

O Acordo de Paris especifica que os países devem “limitar o aquecimento a bem abaixo de 2°C , tendo sido acordado perseguir o limite a $1,5^{\circ}\text{C}$ ”, e para tanto será necessário um esforço especial de adaptação e mitigação no setor energético, no uso da terra, para os ecossistemas, para os sistemas urbanos, industriais e de transporte, e dentro de setores transversais como gestão de risco de desastres, saúde e educação, resíduos sólidos para redução das emissões, uma vez que estas são a maior causa das mudanças climáticas (IPCC, 2018) .

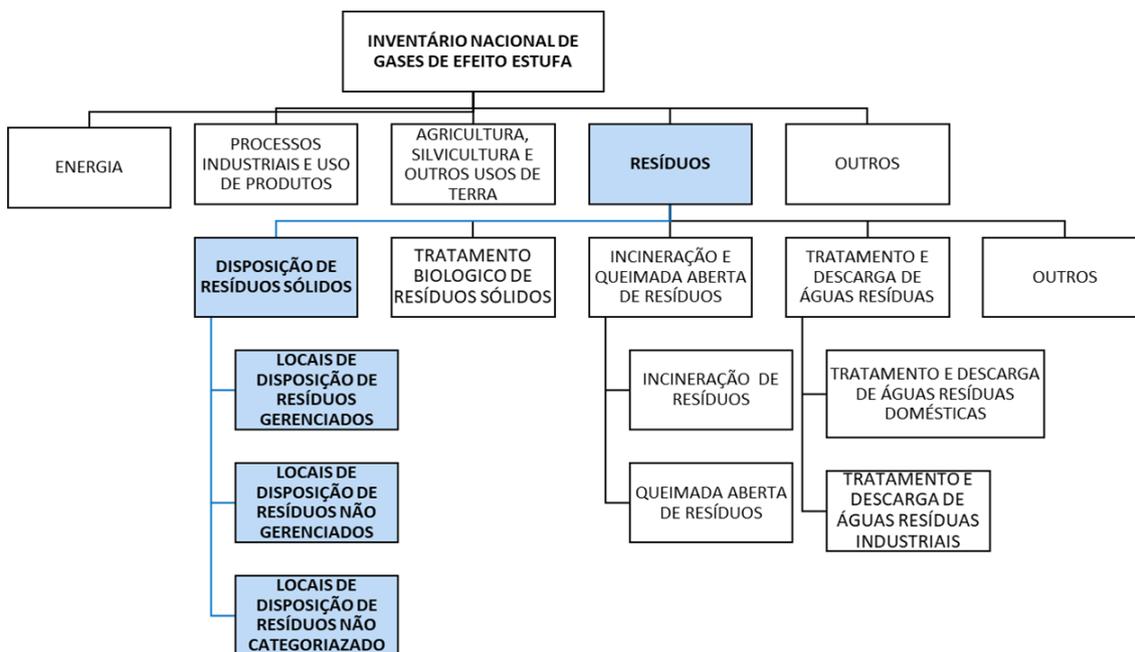
O Relatório demonstra que as trajetórias de evolução das emissões consistentes com o limite de $1,5^{\circ}\text{C}$ implicam reduções rápidas nas emissões

líquidas globais antropogênicas de CO₂ de modo a zerá-las até meados do século, implicando, também, reduções rápidas em outras emissões antropogênicas, particularmente as de metano. Maiores reduções de emissões conseguidas até 2030 levam a uma maior chance de limitação do aquecimento global em 1,5°C sem, ou com limitado, superaquecimento (de zero a 0,2°C) (IPCC, 2018).

2.6.1 Inventário de Emissões de GEE – Método do IPCC (2006)

As diretrizes metodológicas do IPCC definem o enquadramento das emissões por setores, quais sejam: de energia; processos industriais; uso de solventes e outros produtos; agropecuária; tratamento de resíduos; e mudança de uso da terra e florestas. A Figura 15 apresenta as principais categorias segundo IPCC (2006).

Figura 15 - Principais categorias de emissões por setor do IPCC 2006



Fonte: Adaptado de IPCC (2006)

Para o setor de resíduos, a metodologia considera as estimativas das emissões provenientes do dióxido de Carbono (CO₂), do metano (CH₄) e do óxido nitroso (N₂O). As categorias inseridas no setor de resíduos são as seguintes:

- a) disposição de resíduos no solo;
- b) tratamento biológico de resíduos;
- c) incineração e queima de resíduos;
- d) tratamento de águas residuárias.

As diretrizes do IPCC definem a cobertura do inventário nacional em termos de gases e categorias de emissões por fontes e remoções por sumidouros, fornecem orientação adicional sobre a escolha da metodologia de estimativa, melhorias dos métodos, bem como recomendações sobre questões transversais, incluindo estimativas de incertezas, séries temporais, consistência e garantia de qualidade e controle de qualidade.

O IPCC (1996) por meio do guia para o inventário de Gases Nacionais de Efeito Estufa, juntamente com a Orientação de Boas Práticas, com a Gestão da Incerteza Em Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (GPG, 2000) e as Orientações de boas práticas para uso da terra, uso da terra e silvicultura (GPG-LULUCF), fornecem aos países metodologias acordadas internacionalmente para estimar e relatar as emissões de gases de efeito estufa ao UNFCCC.

Neste contexto, as diretrizes do IPCC (2006) contribuem para padronizar os valores do Potencial de Aquecimento Global ou Global Warming Potential (GWP) nos inventários de emissão para gases de efeito estufa diretos, não abrangidos pelo Protocolo de Montreal.

O GWP é uma medida relativa que compara o gás em questão com a mesma quantidade de dióxido de carbono, cujo potencial é definido como 1. O uso do GWP permite que as reduções das emissões do gás metano, óxido nitroso e outros compostos de alto GWP sejam transformadas em “dióxido de carbono equivalente”. O CO₂ equivalente, ou CO_{2e}, é a unidade de moeda de carbono, subsídios e compensações nos projetos de MDL. Na Tabela 10 apresenta-se o GWP utilizado no Relatório do IPCC AR2/2000 e fontes de emissão.

Tabela 10 - Potencial de aquecimento global e fontes de emissões (GWP)

Gases GEE	GWP (2000)	Fontes típicas
Dióxido de carbono – CO ₂	1	Resíduos sólidos urbanos, combustão fóssil, mudança no uso do solo, desmatamento e produção de cimento.
Metano (CH ₄)	21	Resíduos sólidos urbanos, agricultura, manejo de animais e minas de carvão.
Óxido nitroso - N ₂ O	310	Produção e aplicação de fertilizantes.
Hidroclorofluorcarbonos (PCFs)	CF ₄ – 6,5 C ₂ F ₆ – 9,2	Produção de alumínio.
Perfluorcarbonos (PFCs)	HFC – 23	Refrigerantes.
Hexafluoreto de enxofre (SF ₆)	23	Transformadores elétricos Produção de magnésio.

Fonte: Adaptado de IPCC (2000)

Na Tabela 11 apresentam-se os fatores de equivalência em carbono na métrica do Potencial de Aquecimento Global - GWP, considerados pelo IPCC nos relatórios AR2, AR4 e AR5 e utilizados como referência para as Metas Brasileiras de Reduções do Acordo de Paris.

Tabela 11 - Potencial de aquecimento global - relatórios do IPCC

Emissões/Relatório	AR2 (2000)	AR4 (2005)	AR5 (2016)
CO ₂	1	1	1
CH ₄	21	25	28
N ₂ O	310	298	265

Fonte: Adaptado de SEEG (2017)

Observa-se que, durante o período de elaboração dos Relatórios do IPCC, houve uma variação nos valores padrões do GWP utilizados, devido os ajustes de metodologia e mesmo da evolução das condições climáticas.

Os métodos de estimativa de emissões de metano do IPCC (2006) para a categoria de resíduos estão dispostos em três modelos, descritos a abaixo:

- a) Tier 1 – Baseado no método do IPCC FOD simplificado que utiliza basicamente dado e fatores padrão fornecidos globalmente;

- b) Tier 2 – Usa o método do IPCC FOD com parâmetros, padrão, dados de boa qualidade de atividade específica do país e da disposição dos resíduos no solo em um determinado ano;
- c) Tier 3 – são baseados no IPCC FOD com o uso de dados de boa qualidade do país para a atividade específica com parâmetros chave próprios consistentes que incluem tempo de vida, potencial de geração de metano, composição dos resíduos e disposição no solo.

Esses métodos apresentam especificações matemáticas, informações sobre fatores de emissão ou outros parâmetros a serem usados nas estimativas e fontes de dados por categoria para estimar o nível geral de emissões. A provisão de diferentes níveis permite a elaboração de inventários com a utilização de metodologia consistente, de acordo com os recursos existentes, o que permite a concentração dos esforços nas categorias de emissões e remoções que contribuem significativamente para os totais e as tendências das emissões nacionais (IPCC, 2006).

A metodologia do IPCC pode ser adaptada, entre os níveis dos métodos, para um inventário regional e local, utilizando-se os fatores locais de emissão e observando as especificidades das fontes de emissão (IPCC, 2006).

Para a elaboração do inventário é necessário inicialmente escolher um dos três métodos previstos nas diretrizes do IPCC, definir o temporal a partir de série histórica ou não, levantar dados disponíveis, parâmetros e padrões a serem utilizados.

Segundo o IPCC (2006), para o setor de resíduos, a metodologia foi revista e direcionada para as estimativas de emissão do gás metano, pelo seu alto potencial de aquecimento global que é 21 a 28 vezes maior que o do dióxido de carbono. A estimativa deverá ser realizada a partir da disposição dos resíduos no solo, podendo utilizar série histórica ou de um ano específico de deposição. Outro aspecto é a utilização do modelo de Decaimento de Primeira Ordem (FOD) que considera o processo de degrabilidade da matéria, dados históricos e, ainda, a opção de usar dados disponíveis próprios ou de outras fontes e padrões do IPCC. Esta abordagem inclui, também, padrões específicos do país, de uma região ou de um local sobre geração, composição e gerenciamento de resíduos.

Os projetos de redução de emissões de carbono em aterros sanitários no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) adota o modelo do IPCC (2006), assim como os inventários nacionais dos países inseridos na UNFCCC.

O inventário das emissões de GEE proveniente dos resíduos sólidos urbanos tem como foco os resíduos sólidos domiciliares dispostos no solo, nas três classificações definidas pelo IPCC (2006), quais sejam:

- a) Disposição em locais gerenciados, nos quais os aterros sanitários se enquadram;
- b) Disposição em locais gerenciados com mais de 5m de profundidade, considerados os aterros controlados;
- c) Disposição em locais não gerenciados com menos de 5m de profundidade, que são os lixões.

Nesses locais, a principal fonte dos gases de efeito estufa é a decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos que libera o gás metano (CH₄).

A composição do biogás é semelhante à do gás natural combustível, o que possibilita a utilização do mesmo como alternativa para a produção de energia (BANCO MUNDIAL, 2010).

O BANCO MUNDIAL (2010) constatou que no Brasil são poucos os aterros sanitários que usam o biogás para a geração de energia, sendo que a prática mais comum é permitir que o gás escape diretamente para a atmosfera, através de drenos coletores e, em alguns casos, são queimados em flare.

Por outro lado, o CIBIOGÁS (2019) identificou a existência de 276 plantas de geração de biogás, em 2018, no Brasil, das quais 33 utilizam o substrato de resíduos sólidos urbanos ou esgoto, correspondente a 76% da produção do biogás no país para fins energético.

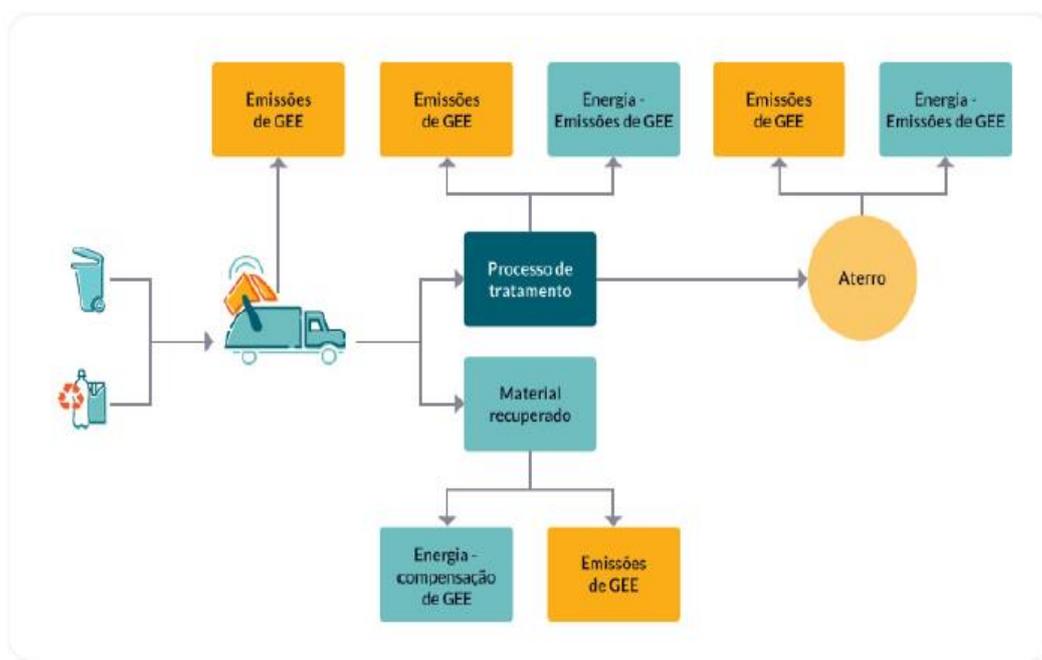
2.6.2 Setor de resíduos sólidos e oportunidades de mitigação dos Gases de Efeito Estufa - GEE

A gestão sustentável de resíduos é relevante tanto para a mitigação das emissões de GEE, como também para adaptação e contribui para atingir os diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), das Nações Unidas, principalmente no campo da saúde, na qualidade da água, impacto ambiental das cidades, consumo e produção sustentáveis e em especial na prevenção de lixo marinho, entre outros.

Na Figura 16 pode se observar os principais pontos de emissões do setor de resíduos, desde o transporte, passando pelos processos de tratamento., recuperação dos materiais e a disposição final em aterros sanitários.

Podendo ser observado que as emissões apesar de ocorrerem durante toda a rota, o IPCC (2006) considera nas estimativas das emissões para o setor de RSU apenas a disposição no solo.

Figura 16 - Pontos de emissões no manejo dos RSU



Crédito: Marcelo Ronald Lucena da Silva

Fonte: GIZ (2017)

Em comparação com outros setores que contribuem com os GEE, a relevância da sustentabilidade na gestão de resíduos para a mitigação das mudanças climáticas pode parecer relativamente pequena, uma vez que representa apenas 3 a 5%. Contudo, a mitigação no setor de resíduos tem impactos significativos sobre emissões de GEE geradas e reportadas em outros setores, como setor de energia, agricultura, transporte e indústria (GIZ, 2017).

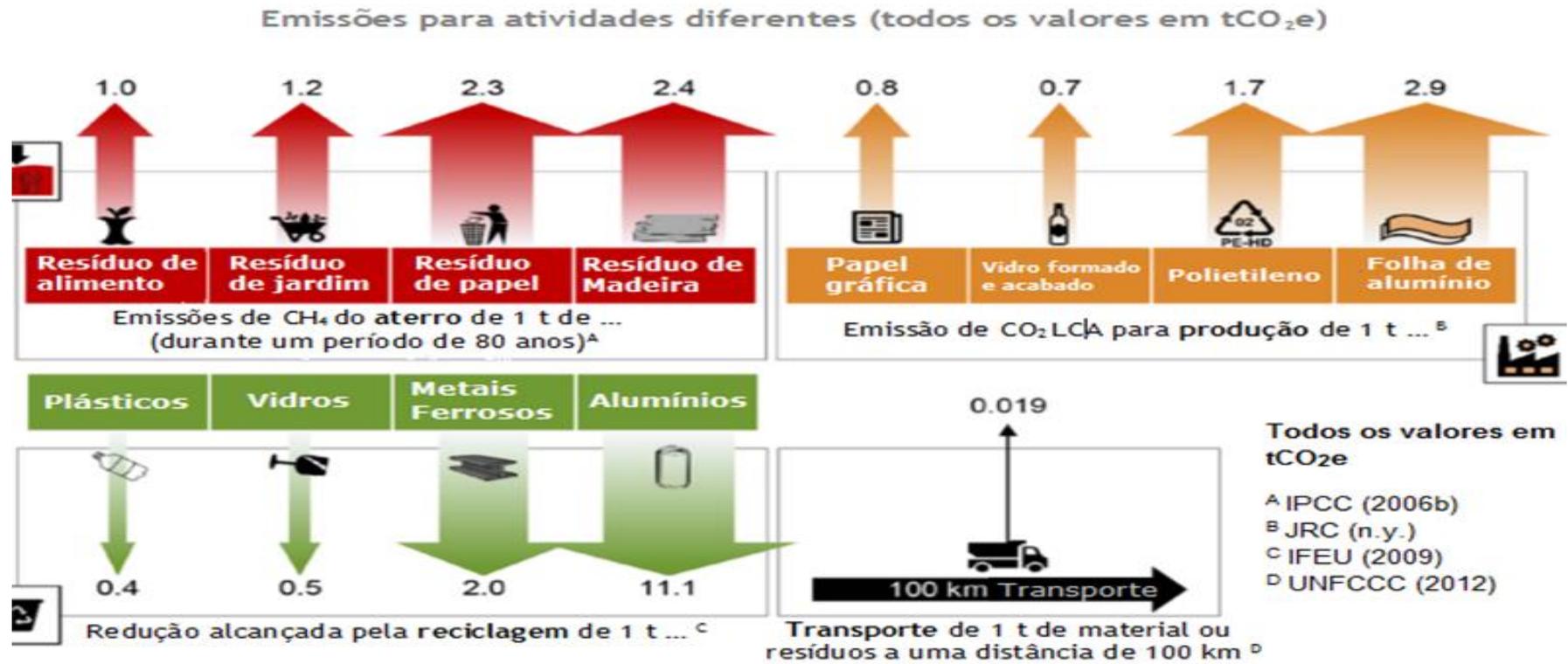
Assim, o setor de resíduos tem potencial para deixar de ser uma fonte de emissões, para tornar-se opção de mitigação, dentro de uma abordagem da economia circular que engloba a eliminação de resíduos com a reutilização de materiais e componentes e extensão da vida útil dos produtos, com rebatimento na emissão de gases em todos os outros setores da economia. Por exemplo, o aproveitamento do biogás da digestão anaeróbica dos resíduos e a otimização do transporte implica na redução da utilização de combustível fóssil e emissões na produção de energia, ações mitigadoras contabilizadas no setor energético e não no setor de resíduos.

Adicionalmente, a gestão sustentável de resíduos é relevante, também, para adaptação, uma vez que os resíduos quando não coletados, chegam aos sistemas de drenagem e, portanto, aumenta o risco de inundações em áreas urbanas; então, a melhoria na coleta, sistemas de tratamento e disposição reduzem os efeitos negativos de eventos climáticos extremos.

Para UNEP/ISWA (2015), se os efeitos da prevenção de resíduos para evitar emissões a partir do uso de recursos primários e recuperação de resíduos fossem incluídos para o próprio setor, a contribuição relacionada à gestão dos RSU para mitigar o total de GEE poderia aumentar para 15-20%.

Estudo da Agência Alemã, GIZ (2018), indicou que as emissões de CH₄ provenientes de diferentes atividades para cada componente do RSU disposto em um aterro variam em função da sua composição. Da mesma forma, durante o processo produtivo dos materiais virgens (plástico, vidro, aço e alumínio), as emissões quantificadas, em uma análise de ciclo de vida, não são contabilizadas no setor de resíduos, que podem ser mitigadas pela utilização de materiais recicláveis, com benefícios econômicos e ambientais da reciclagem em relação à produção, em termos de consumo de recursos naturais, de energia e de emissões evitadas.

Na Figura 17 estão indicadas geração e redução de emissões de CH₄ para diferentes atividades, segundo estudo da GIZ (2018).

Figura 17 - Emissões e redução para atividades diferentes (tCO₂e)

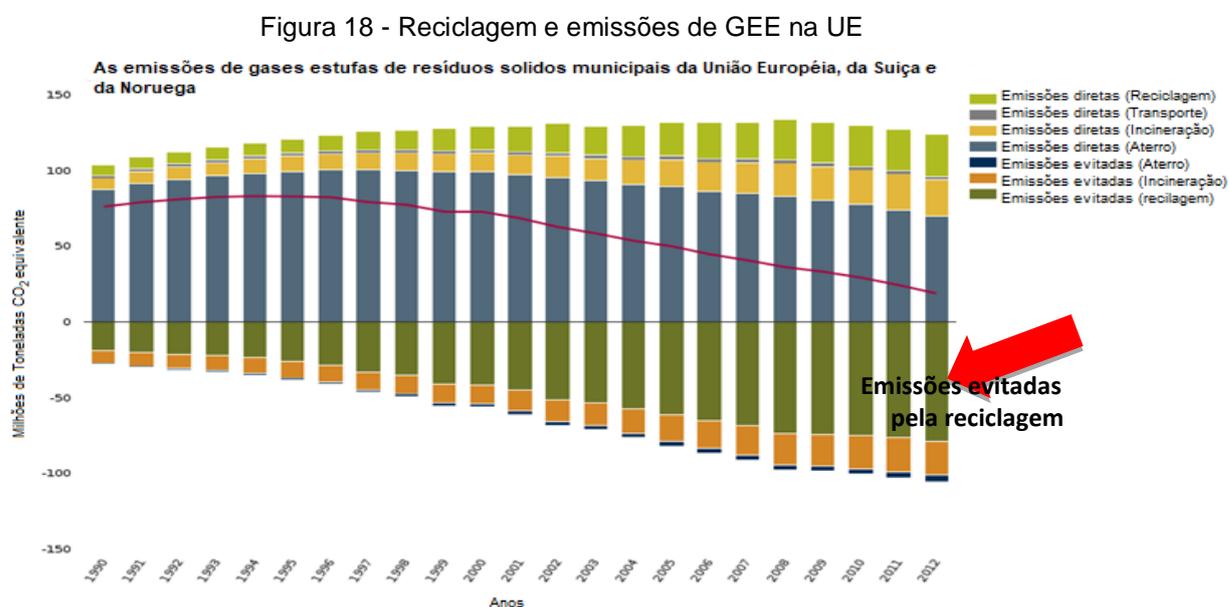
Fonte: GIZ (2018)

A Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), em outubro de 2018, validou a metodologia AMS-III.BA.: Recovery and recycling of materials from E-waste para estimar o potencial de redução das emissões de CO₂ equivalente para projetos de recuperação e reciclagem de resíduos sólidos.

Essa metodologia é utilizada pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que possibilita a geração dos “créditos de carbono” pelas normas estabelecidas no âmbito do Protocolo de Quioto, denominados de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) e é um avanço nas determinações das emissões nos processos produtivos e quantificação de emissões evitadas pela reciclagem, devendo ser estudada o papel das cooperativas e associações de materiais recicláveis na redução dos gases de efeito estufa.

A importância da reciclagem para a mitigação das emissões tomou uma dimensão na política de resíduos sólidos, inclusive na Alemanha, considerando que os resíduos sólidos se constituem em recursos e, dentro de uma perspectiva de fechamento de ciclo vida, a tendência mundial é uma transição para uma economia circular. A Diretiva Europeia, (FRICKE, 2015) adota uma nova hierarquia de gestão, onde o reaproveitamento e a reciclagem têm preferência sobre outras rotas de aproveitamento, se referindo por um lado ao aproveitamento térmico e por outro da destinação em aterros.

A Figura 18, apresenta as emissões decorrente da União Europeia (UE), na qual pode se observar as emissões evitadas pelo processo de reciclagem.

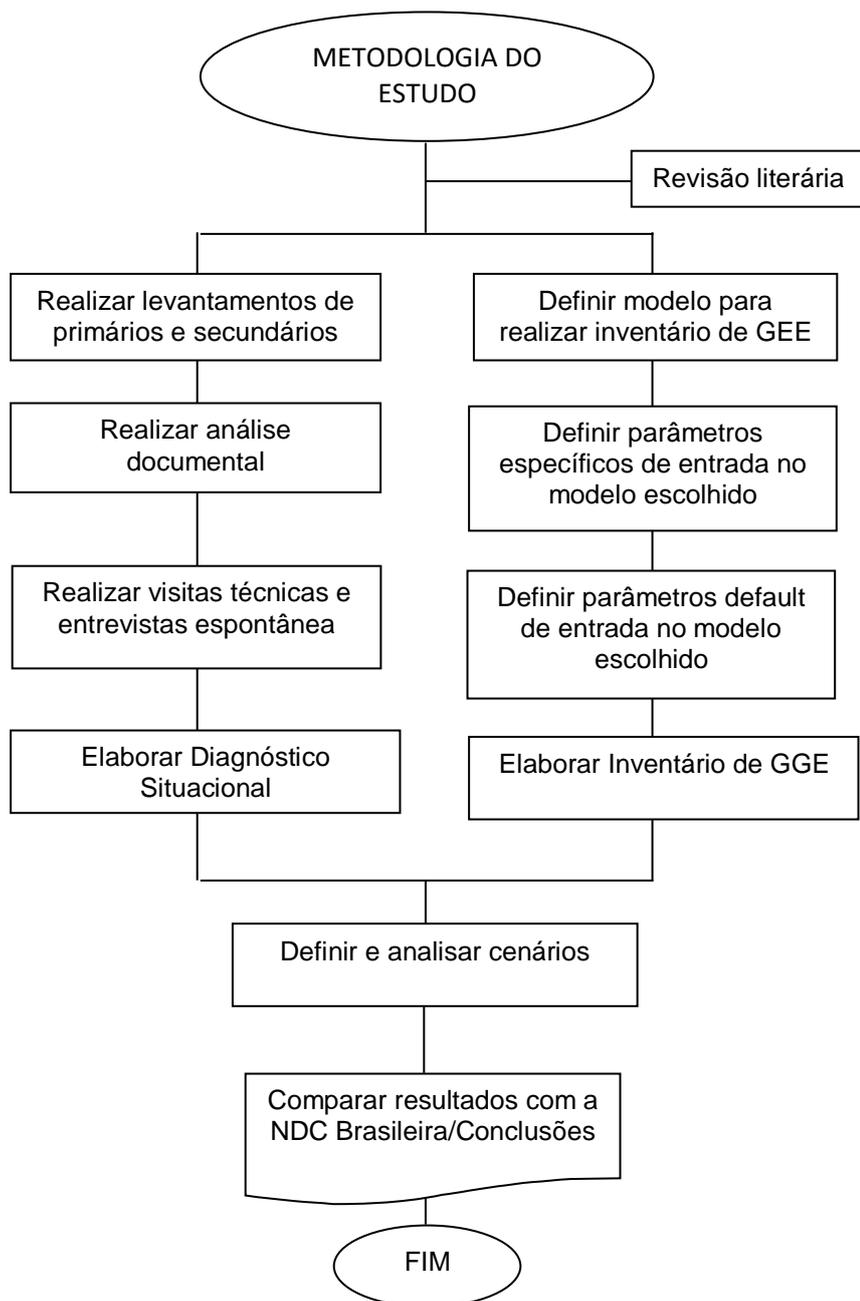


Fonte: Eurostat (2018)

3 MATERIAIS E MÉTODO

Neste estudo foi realizada uma pesquisa exploratória, iniciando-se com a revisão literária e do arcabouço legal acerca das temáticas envolvidas neste trabalho, bem como levantamento de dados primários e secundários junto aos municípios e centrais de tratamento de resíduos da RMR. A metodologia utilizada está apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Fluxograma da metodologia

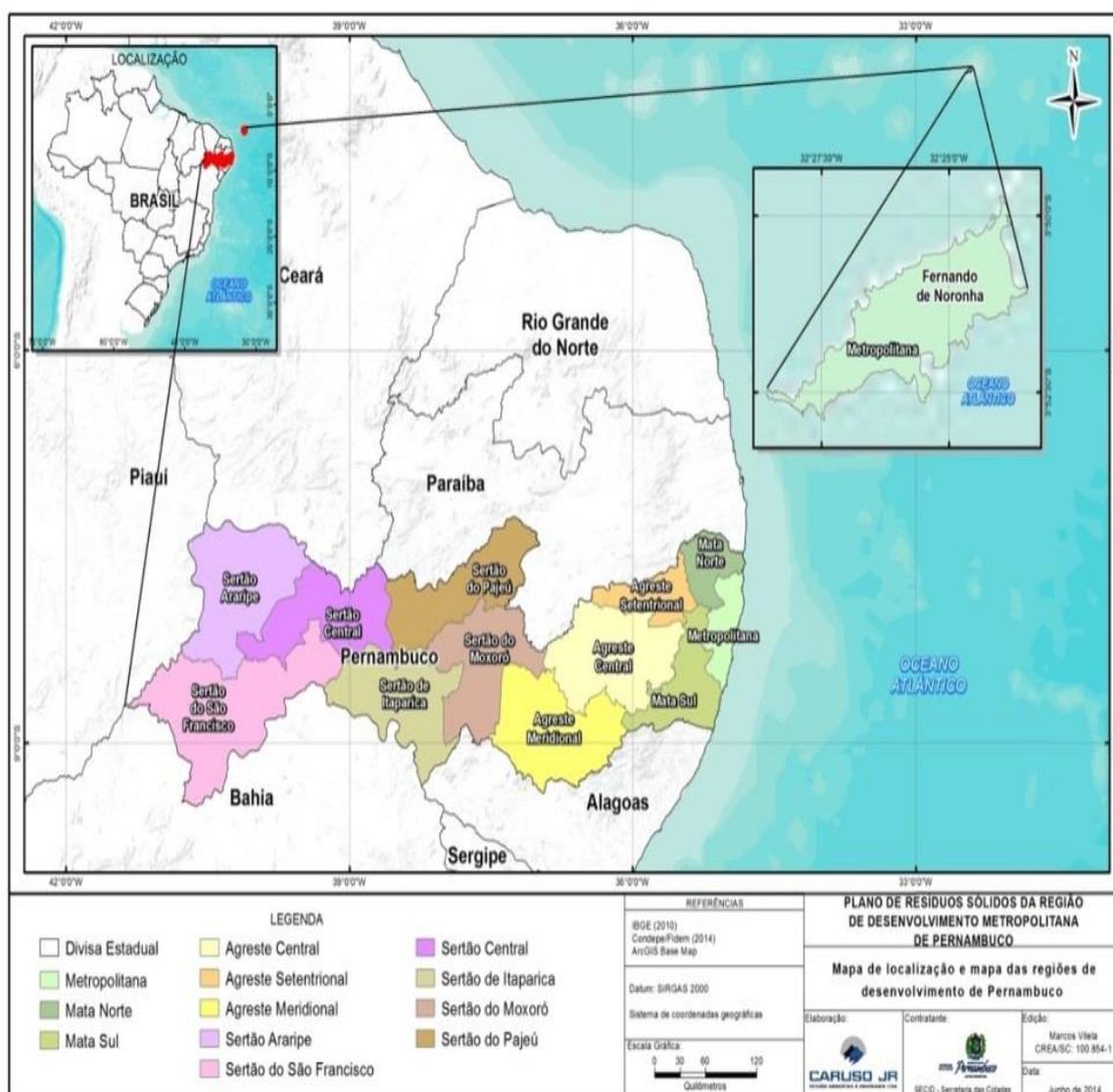


Fonte: Autora (2020)

3.1 OBJETO DE ESTUDO – REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE

O Estado de Pernambuco é composto por 12 Regiões de Desenvolvimento, conforme divisão geopolítica estadual, estabelecida pela Lei Estadual 13.306/2007 (Figura 20). Localizada na costa do nordeste brasileiro. A Região de Desenvolvimento Metropolitana, por sua vez, contempla os 15 municípios da Região Metropolitana do Recife – RMR e o Distrito Estadual de Fernando de Noronha.

Figura 20 - Regiões de desenvolvimento do Estado de Pernambuco



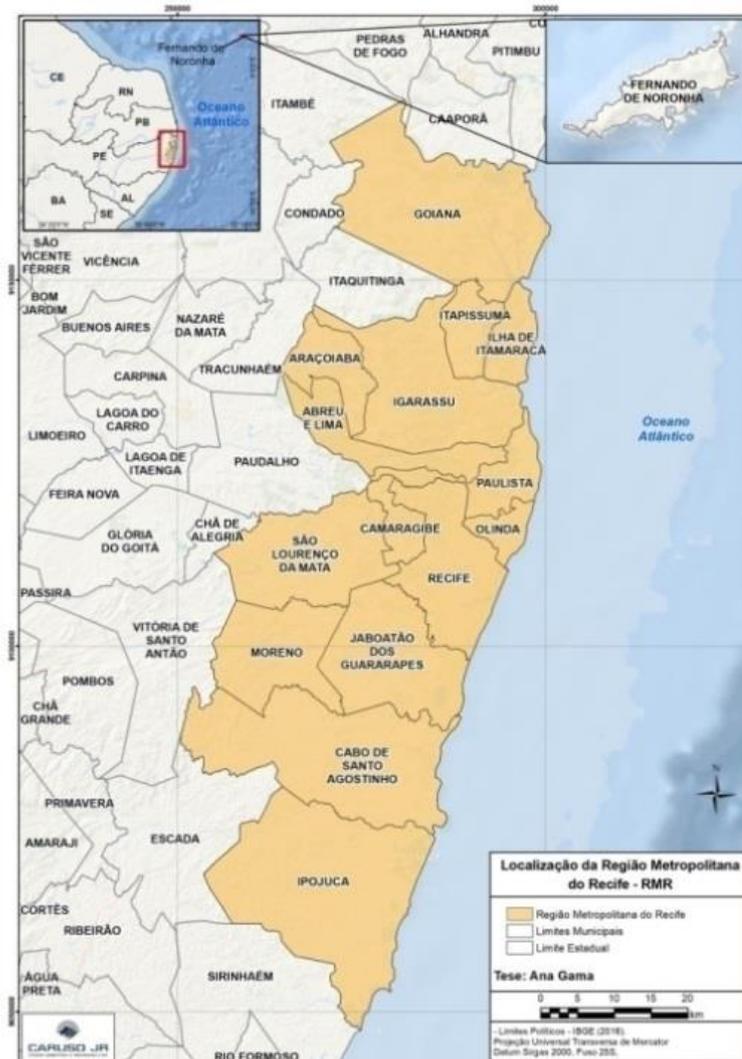
Fonte: PERNAMBUCO (2015)

Originalmente a Região Metropolitana do Recife - RMR continha 08 municípios: Recife, Cabo de Santo Agostinho, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista e São Lourenço da Mata.

Em 1982, os municípios de Abreu e Lima, de Camaragibe e de Itapissuma, passaram a integrar a RMR. Em 1994 e 1995, os Municípios de Ipojuca e Araçoiaba foram inclusos, respectivamente.

Em 2018, foi definida uma nova governança para a RMR, atendendo o Estatuto da Metrópole (Brasil, 2015), que passou a ser composta de 15 municípios, com a integra o do município de Goiana (Figura 21). Em março de 2020, encontrava-se em tramita o um Projeto de Lei, para retornar o município de Goiana   Região da Zona da Mata.

Figura 21- Abrangência espacial da Região Metropolitana de Recife em 2018



Fonte: PERNAMBUCO (2018)

3.1.1 População

A Região Metropolitana do Recife (RMR) constitui o maior e principal aglomerado urbano da Região Nordeste e a sexta maior do país, com uma população de 4.054.866 milhões de habitantes, concentrando 42,70% da população do estado de Pernambuco (IBGE, 2018).

Com uma área de 3.216.262 km², a população em 2010 era de 3.690.547 habitantes (IBGE, 2010). Estimou-se, em 2016, 4.019.396 habitantes e, em 2018, de 4.054.866 (IBGE, 2016 e 2018).

A densidade demográfica é de 1.249,7 hab/km² e o IDH médio de 0,729 (IBGE, 2010). Na Tabela 12, apresenta-se a população urbana da RMR.

Tabela 12 - População urbana dos municípios da RMR 2016 e 2018

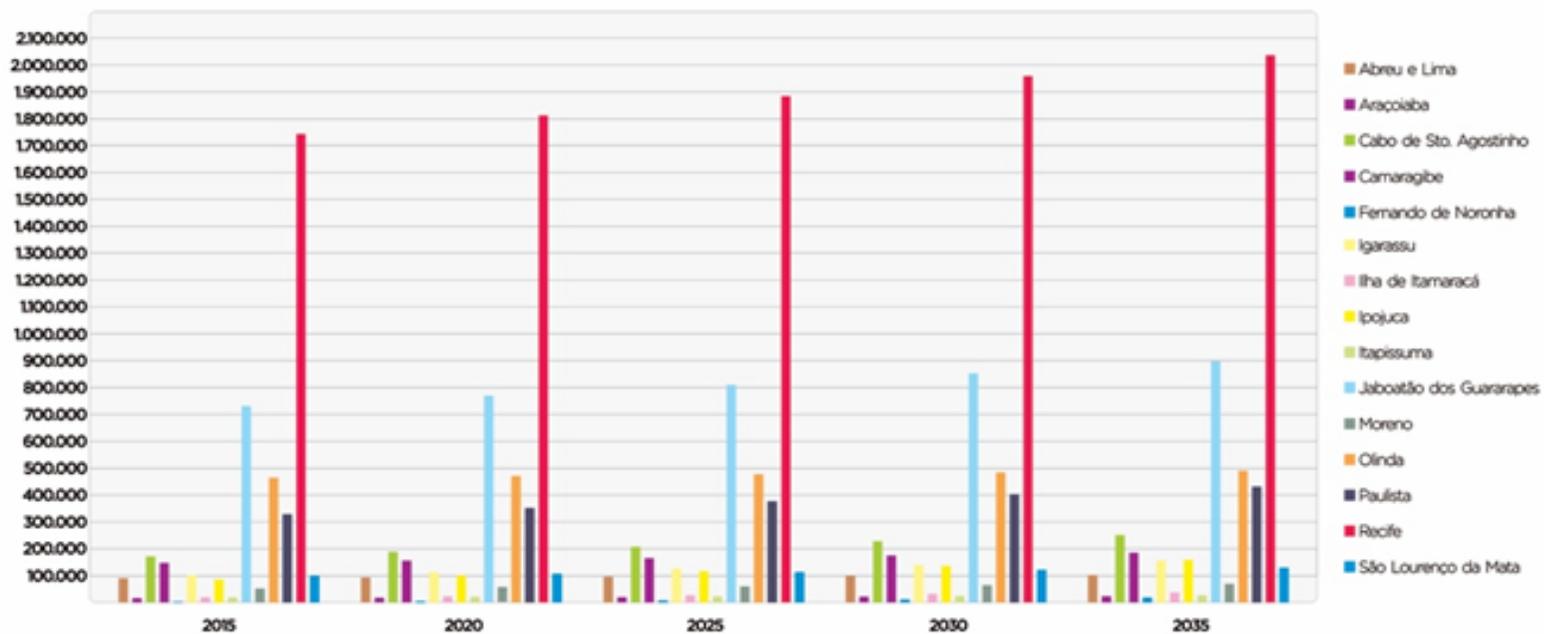
Município	População (Hab.)		%
	2016	2018	
Abreu e Lima	98.900	99.622	2,5
Araçoiaba	20.046	20.312	0,5
Cabo de Santo agostinho	202.636	205.112	5,0
Camaragibe	155.228	156.726	3,9
Goiana	78.940	79.455	2,0
Igarassu	113.956	115.640	2,8
Ilha de Itamaracá	25.346	25.836	0,6
Ipojuca	92.965	94.709	2,3
Itapissuma	26.073	26.397	0,6
Jaboatão dos Guararapes	691.125	697.636	17,2
Moreno	61.577	62.263	1,5
Paulista	325.590	329.117	8,1
Recife	1.625.583	1.637.834	40,4
São Lourenço da Mata	111.197	112.362	2,8
RMR	4.019.396	4.054.866	100

Fonte: Adaptado de IBGE (2016 e 2018)

Os municípios mais populosos são Recife, Jaboatão dos Guararapes e Olinda, enquanto Araçoiaba, Ilha de Itamaracá e Itapissuma são os que apresentam menor população e Goiana recém-inclusa na RMR, que contribui com 2,0% (Tabela 10).

Na Figura 22, representa-se a projeção da população da RMR de 2015 a2035.

Figura 22 - Projeção da população da RMR (2015 a 2035)



Fonte: Adaptado de IBGE (2010)

3.1.2 Aspectos fisiográficos

O principal aspecto fisiográfico para o desenvolvimento deste trabalho é o Clima por subsidiar a definição dos padrões a serem utilizados no modelo do IPCC.

3.1.2.1 Clima

Segundo (CPRM, 2003) a RMR apresenta um clima litorâneo úmido, influenciado por massas tropicais marítimas. No que tange à temperatura do ar média compensada, a região apresenta uma variação entre 23,9°C e 26,6°C, com uma média anual de 25,5°C.

O clima litorâneo úmido é caracterizado por alta porcentagem de umidade que oscilam entre 73% e 85%, com média anual de 79,8%. Os totais anuais médios de precipitação nos municípios da RMR variam de mais de 2.200mm, nas áreas litorâneas, decrescendo à medida que se afastam do litoral até valores próximos a 1.200mm, na parte oeste. O trimestre mais chuvoso, que engloba os meses de maio, junho e julho, concentra 47% dos totais anuais (CPRM, 2003) .

3.1.3 Governança interfederativa metropolitana

A Lei Complementar Estadual 10, de 06 de janeiro de 1994, instituiu o Sistema Gestor Metropolitano (SGM) e o Conselho de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (CONDERM) – na qualidade de órgão deliberativo e consultivo, integrante da estrutura administrativa da Secretaria de Planejamento do Estado. A Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FIDEM) foi instituída pela Lei nº 6.890, de 03 de junho de 1975 - na qualidade de secretaria executiva e com a atribuição de prestação de apoio técnico ao CONDERM e ao Fundo de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FUNDERM) - instituído pela Lei nº 7.003, de 02 de dezembro de 1975, como instrumento financeiro das Câmaras Técnicas Setoriais – apoio técnico ao CONDERM.

Em 2017, o Projeto de Lei Complementar 1739/2017, propõe o Sistema gestor Metropolitano, em função do Estatuto da Metrópole – Lei Federal nº 13.089/2015.

Para a implementação da governança metropolitana, as principais ações apontadas pela CONDEPE/FIDEM¹ foram:

- a) adequação da Lei Complementar nº10/1994;
- b) ampliação do CONDERM, incluindo a Sociedade Civil;
- c) reestruturação das Câmaras Técnicas Setoriais;
- d) criação do Fórum de Secretários Municipais de Planejamento;
- e) reestruturação do órgão técnico consultivo – CONDEPE/FIDEM;
- f) definição do modelo para execução das Funções Públicas de Interesse Comum (FPICs);
- g) elaboração do Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado (PDUI).

Em 10 de janeiro de 2018, foi sancionada a Lei Complementar Estadual 382, que adéqua a governança da RMR ao Estatuto da Metrópole e integra o município de Goiana à RMR. Ressalte-se que, em 2020, Goiana foi desmembrada da RMR.

3.1.4 Estrutura da gestão consorciada dos resíduos sólidos

A estruturação do Consórcio Metropolitano de Resíduos Sólidos se faz essencial para a implementação da gestão metropolitana. Vale ressaltar que a formação do consórcio metropolitano vem sendo tratada desde o Plano Metropolitano de Resíduos, elaborado em 2009, porém entraves políticos dificultam a formalização. O objetivo do consórcio é o atendimento aos seguintes quesitos:

- a) a universalização dos serviços de manejo e tratamento dos resíduos sólidos, prevendo-se o alcance de padrões de prestação de serviços de forma mais homogênea aos municípios integrantes da RDM/PE;

¹Plano de Atividades para o Estatuto da Metrópole. Reunião com órgãos municipais. CONDEPE/FIDEM. 18 de julho de 2017.

- b) a proteção do meio ambiente e da saúde pública;
- c) a inclusão social dos catadores de materiais recicláveis;
- d) a geração de trabalho e renda.

A gestão consorciada foi analisada conjuntamente com a definição das Funções Públicas de Interesse Comum (FPICs) dentro da governança metropolitana. Na Figura 23 apresenta-se as FPICS e os resíduos de enquadra no componente do saneamento ambiental.

Figura 23 - Funções públicas de interesse comum (FPICs)



Fonte: CONDEPE/FIDEM¹ (2017)

O processo de formação do Consórcio metropolitano encontra-se na Figura 24.

Figura 24 - Processo de formação do consórcio metropolitano.



Fonte: Pernambuco (2018)

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS: DIAGNÓSTICO SITUACIONAL E INVENTÁRIO DE GEE

Para a elaboração do diagnóstico situacional da gestão dos resíduos sólidos na RMR e da estimativa de GEE, tomou-se como premissa a priorização de dados oficiais, utilizando-se a estatística nacional para população, clima e geração de resíduos sólidos urbanos, publicados nos Censos Demográficos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Sistema Nacional de Saneamento Básico (SNIS).

Adicionalmente foram realizados levantamentos em outras fontes primárias e secundárias, tais como estudos e pesquisas realizadas, documentos e registro em arquivo, desta forma os dados foram provenientes de documentos do Ministério da Ciência Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC), órgão responsável pela implementação da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil no Acordo de Paris, do Ministério do Meio Ambiente e do Ministério das Cidades. Assim como nos sites internacionais da Convenção-Quadro sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), de entidades como a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) e do Observatório do Clima/Sistema de Estimativa de Emissão dos Gases de Efeito Estufa- SEEG.

Foram analisados os Planos de Resíduos Sólidos Nacional, Estadual, da RMR e Municipais, e o Estudo de Concepção do Sistema Metropolitano da RMR. Além das Políticas para enfrentamento das mudanças climáticas do Estado de Pernambuco e do município de Recife.

Ressalte-se que foram estudadas pesquisas desenvolvidas no âmbito acadêmico com relação à gestão de resíduos, composição gravimétrica e geração de gases.

Para realização deste estudo considerou-se estratégica a realização de visitas técnicas nos locais de disposição de resíduos, frente às diferentes características políticas, geográficas, ambientais e sociais dos municípios da RMR. Esta abordagem permitiu um conhecimento técnico sobre os lixões, aterros sanitários ou controlados existentes. Adicionalmente foram realizadas entrevistas espontâneas presenciais e a distância, objetivando o levantamento de informações complementares sobre o manejo de resíduos sólidos, junto aos gestores municipais e equipes responsáveis pelas centrais de tratamento que atendem à Região Metropolitana do Recife (RMR).

O Guideline for National Greenhouse Gas Inventories 1996, revised 1996, a GPG2000 – Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories e do IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006, foram, também, objetos deste estudo. Esses documentos se complementam, ajustam os modelos matemáticos e alteram parâmetros utilizados para estimativas das emissões nacionais dos países integrantes da Convenção das Mudanças do Clima (UNFCCC).

3.3 MODELO PARA ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE GEE

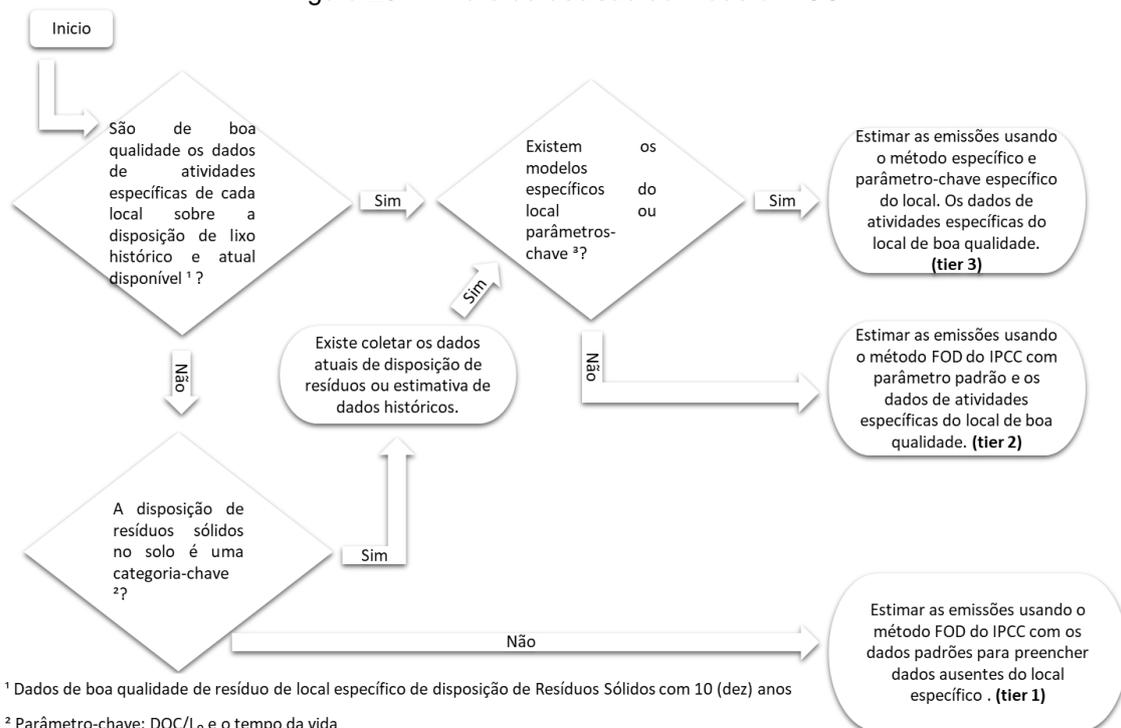
O modelo utilizado para o Inventário das Estimativas das Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) baseou-se nas diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2006), que considera como principal fonte de emissões do setor de resíduos a disposição de RSU no solo, especificamente os resíduos municipais domiciliares, para o qual o carbono orgânico degradável (DOC) dos resíduos decai ao longo dos anos, e considerando a fração de decomposição dos componentes dos resíduos, possibilitando uma visão de médio prazo do padrão de emissões decorrentes

das opções de disposição final dos RSU e estabelece categorias de aterramento.

Neste sentido, foi realizada uma correlação entre as categorias de disposição do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e do IPCC (2006).

O modelo metodológico escolhido, conforme árvore de decisão do IPCC (2006), constante na Figura 25, é o classificado como Tier2, que considera o decaimento de primeira ordem para a estimativa de GEE, utiliza dados de atividades específicas da RMR e fatores padrão (default).

Figura 25 - Árvore de decisão do modelo IPCC



Fonte: Traduzida e adaptada de IPCC (2006)

3.3.1 Equações do modelo do IPCC (2006) - Tier2

No modelo Tier2 a determinação das emissões de gases é baseada na equação (IPCC, 2006).

$$Q(t) = \sum * \{ [(A * K * MSW_{t(x)} * MSW_{f(x)} * Lo_{(x)} * e^{-k(t-x)}) - R * (1 - OX)] \} \quad (1)$$

Onde:

Q (t) - CH₄ emitido

A – Fator de normalização da soma (adimensional)

$$A = \frac{1 - e^{-k}}{k} \quad (2)$$

K - Constante de geração/decaimento de CH₄(ano⁻¹) 1/ano

X - Categoria do material (disposição)

t - Ano do inventário

MSW_(t) - Quantidade total de resíduos gerados no ano em estudo (t/ano)

MSW_(f) - Fração de resíduos destinado ao aterro no ano (adimensional)

Lo_(x,t) - Potencial de geração de CH₄ (tCH₄/tMSW)

R - CH₄ recuperado (tCH₄.^{-ano})

OX - Fator de Oxidação (Adimensional)

Segundo o IPCC (2006), o potencial CH₄ (Lo) que é gerado ao longo do ano pode ser estimado com base nos valores de decomposição dos resíduos dispostos no solo e as práticas de gerenciamento de resíduos nos locais de disposição. Considerando a conversão de Quantidade de Carbono Orgânico Degradável Passível de Decomposição (DDOC_M) no potencial de geração de metano (Lo), que assume a Equação 3.

$$LO = DDOC_M * F * 16/12 \quad (3)$$

Na qual:

L0 - Potencial de Geração de Metano (tCH₄/tMSW)

DDOC_M – Quantidade de Carbono Orgânico Degradável Passível de Decomposição

F – Fração de Metano no Biogás (Adimensional)

16/12 – Razão estequiométrica de conversão entre Metano (CH₄) e Carbono (C), (adimensional)

Por sua vez o DDOC_M é calculado pela seguinte expressão:

$$DDOC_M = MSW_T * DOC * DOC_f * MCF \quad (4)$$

Onde:

MSW_T - Quantidade total dispostos no ano em aterramento tipo “x” [t]

DOC – Carbono orgânico degradável (tC/tMSW)

DOC_f – Parcela de DOC convertida em gás no aterro (adimensional)

MCF – Fator de correção do metano referente ao gerenciamento dos locais de disposições (adimensional)

A partir das equações 1, 2 e 3 a quantidade de metano emitido (Q_T) será determinada pela equação seguinte:

$$Q_T = \{LO - (R) * (1 - OX)\} \quad (5)$$

A partir das Equações 1 e 4 a quantidade de emissões de CH_4 será calculada pela equação 6, a seguir:

$$Q_T = \{\sum MSW_T * MCF * DOC * DOC_f * F * \frac{16}{12} - (R) * (1 * OX)\} \quad (6)$$

O objeto deste estudo é a RMR, composta por 15 municípios, e se tomou como referência o 3^o Inventário Nacional do Brasil, Brasil (2016), no qual a estimativa de emissão para os resíduos foi feita com a desagregação municipal. Desta forma, a soma total das emissões dos municípios é calculada pela equação 7 a seguir.

$$Emissão\ Total = \sum_J Q_T \quad (7)$$

J - municípios

Portanto, a estimativa das emissões de metano (CH_4) pelos resíduos sólidos urbanos dispostos no solo na RMR foi realizada por município, e a emissão total, corresponde à soma das emissões de todos os 15 municípios, para os anos de 2005 – 2030. Desta forma a Equação 8, adaptada para RMR, por ano, é:

$$Emissão\ da\ RMR = \sum_J Q_{T(ano)} \quad (8)$$

J- 15 municípios

$$Q_{T(ano(n))} = \sum_{(j)} \{[1 - e^{-k} * \left(MSW_{T(ano(n))} * MCF * DOC * DOC_f * e^{-k*(t=1)} * F * \frac{16}{12} \right) - R * (1 - OX)]\}$$

J- 15 municípios

(9)

O DOC é calculado pela equação:

$$DOC = (0,40 * A) + (0,24 * B) + (0,15 * C) + (0,43 * D) + (0,20 * E) \quad (10)$$

Onde: A, B, C, D e E corresponde à fração do carbono degradável dos resíduos dispostos, obtido da composição gravimétrica.

Por fim, a quantidade de metano emitido durante o período de 2005 a 2030 é calculada pela equação 11.

$$Q_{CH_4(t=1)}^{2030} = Q_{CH_4(t=25)}^{2005} + Q_{CH_4(t=24)}^{2006} + Q_{CH_4(t=23)}^{2007} + (...) + Q_{CH_4(t=1)}^{2030} \quad (11)$$

O metano emitido, convertido em tCO_{2e}, é calculado considerando o Potencial de Aquecimento Global (GWP),

$$tCO_{2e} = Q_T * GWP \quad (12)$$

Onde:

tCO_{2e} - Total de dióxido de carbono equivalente

3.3.2 Locais de disposição de RSU da RMR estudados

A caracterização dos locais de disposição dos RSU está na Tabela 13.

Tabela - 13 Caracterização dos locais de disposição estudados

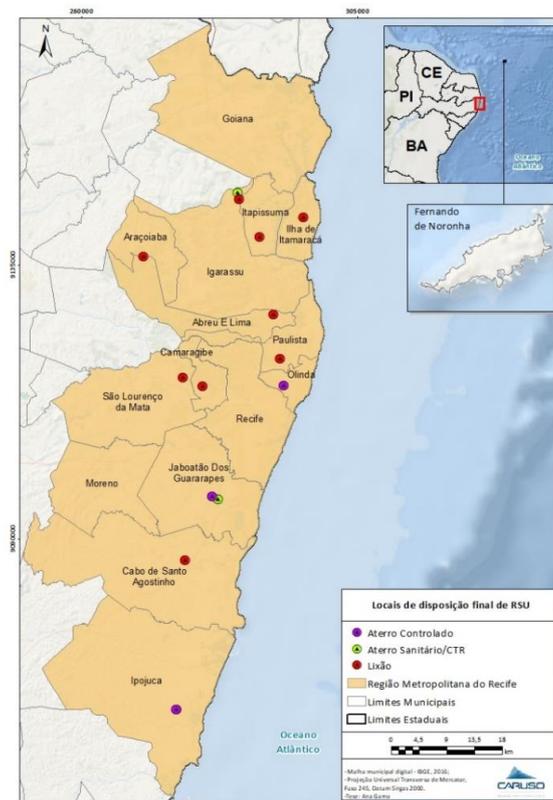
Locais de disposição Município	Área ha.	Operação	Coordenadas UTM		
			Zona	X (E)	Y (N)
Central de Tratamento Candeias /Jaboatão dos Guararapes	170,00	Ativo desde: 2007	25L	282199.00	9096611.00
		Vida útil: 2033			
Central de Tratamento Pernambuco /Iguarassu	106,00	Ativo desde: 2008	25M	285454.29	9147005.17
		Vida útil: 2035			
Aterro controlado de Aguazinha /Olinda	19,00	Início: 1998	25M	292943.48	9115324.24
		Desativação: 2010			
Aterro controlado de Muribeca/Jaboatão dos Guararapes	60,00	Início: 1985	25L	281270.54	9097035.83
		Desativação: 1990			
Aterro Controlado de Ipojuca	40,00	Início AC: 2012	25L	275466.15	9062088.78
		Desativação: 2020			
Lixão de Inhamã/Abreu e Lima	4,745	Início:1991	25M	291413.00	9127116.00
		Desativação: 2011			
Lixão de Araçoiaba	9,354	Início: 2004	25M	270076.73	9136571.78
		Desativação: 2013			
Lixão de Pista Preta/Cabo de Sto. Agostinho	1,839	Início: 2003	25L	276847.81	9086541.82
		Desativação: 2007			
Lixão de Igarassu	4,631	Início: 2003	25M	285667.63	9145892.15
		Desativação: 2007			

Lixão de Itamaracá	3,542	Início: 1990	25M	296120.76	9142966.62
		Desativação: 2010			
Lixão de Itapissuma	4,20	Início: 1988	25M	289037.91	9139703.41
		Desativação: 2013			
Lixão da Mirueira/Paulista	14,00	Início: 1978	25M	292311.78	9119677.45
		Desativação: 2008			

Fonte: Autora (2020)

A espacialização e imagens dos locais de disposição dos resíduos sólidos urbanos estudados pelas tipologias aterros sanitários, aterros controlados e lixões na RMR, estão representadas nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Espacialização dos locais de disposição estudados



Fonte: Autora (2020)

Figura 27 – Locais de disposição dos RSU (2006 a 2018)



Fonte: Autora (2020)

3.3.3 Dados utilizados:

Os dados utilizados na pesquisa foram os seguintes:

3.3.3.1 Temporal

Tomou-se como ano de referência, nesta pesquisa, 2005, ano base da Contribuição Determinada Nacional (NDC) Brasileira (MMA, 2015).

Os anos 2025 e 2030, por serem os definidos para cumprimento das metas da NDC.

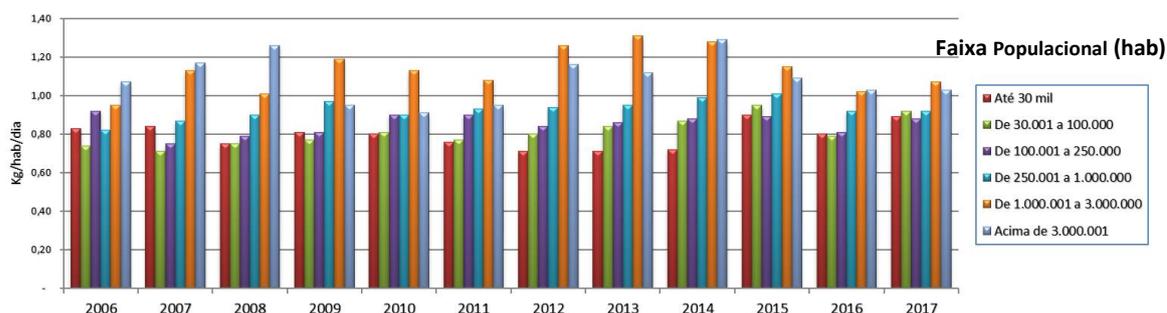
Os dados de 2005 foram reportados do Relatório do Inventário de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos em Pernambuco (FIRMO; RODRIGUES, 2006), no qual o período estudado foi de 1990 a 2005. Entretanto, como de acordo com o modelo, a emissão de metano persiste ao longo de aproximadamente 20 anos após a disposição dos resíduos, foi realizado o levantamento de dados de 1970 a 2005.

Os dados de populações para os anos de 2006 a 2010 foram obtidos do Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), e para os anos intermediários a esses foi calculada a projeção geométrica, levando-se em conta as estimativas do IBGE de 2010 a 2019.

3.3.3.2 Geração *per capita*

Os dados de geração dos resíduos sólidos urbanos foram definidos a partir dos dados do Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS), disponíveis para o período de 2006 a 2017 (Figura 28), levando-se em consideração a faixa populacional de cada município por ano; admitiu-se que a massa coletada seria equivalente à disposta nos locais de manejo, resultando uma taxa média *per capita* para a RMR de 0,91 kg/hab./dia, inferior a da média nacional, que foi de 0,95 em 2017.

Figura 28 - Geração per capita nacional por faixa populacional



Fonte: Adaptada de SNIS (2006 – 2017)

Trabalhando-se os dados populacionais com as faixas do SNIS, observa-se que, na RMR: três (03) municípios encontram-se na faixa 1; nas faixas 2, 3 e 4 estão a maioria dos municípios da RMR, (10); e na faixa cinco (05) apenas o Recife (Tabela 14). Importante registrar que Igarassu e Abreu e Lima passou de faixa 3 para 4 no ano de 2014.

Tabela 14 - Quantidade de municípios por faixa populacional

Faixa	População	Nº de municípios
1	até 30.000 hab.	03
2	de 30.001 à 100.000 hab.	04
3	de 100.001 à 250.000 hab.	03
4	de 250.001 à 1.000.000 hab.	03
5	de 1000.001 à 3.000.000 hab.	01
6	acima de 3.000.001 hab.	0

Fonte: Adaptado de SNIS (2017)

Ressalte-se que, à exceção de Recife, os demais municípios da RMR apresentaram uma geração *per capita* inferior à média nacional, que foi de 0,95 em 2017.

A geração per capita adotada para a RMR, com base em (FIRMO; RODRIGUES, 2006) e SNIS (2006 a 2017), encontra-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Geração *per capita* adotado para os municípios da RMR por faixa populacional (2005 a 2030)

Ano	ABREU E LIMA	ARAÇOIABA	CABO DE SANTO AGOSTINHO	CAMARAGIBE	GOIANA	IGARASSU	IPOJUCA	ITAMARACÁ	ITAPISSUMA	JABOATÃO DOS GUARARAPES	MORENO	OLINDA	PAULISTA	RECIFE	SAO LOURENÇO DE MATA	Média dos anos
2005	0,71	0,74	0,79	0,79	0,71	0,71	0,71	0,74	0,74	0,81	0,74	0,81	0,81	0,94	0,74	0,77
2006	0,74	0,83	0,92	0,92	0,74	0,74	0,74	0,83	0,83	0,82	0,74	0,82	0,82	0,95	0,74	0,81
2007	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,92	0,92	0,89	0,89	0,92	0,71	0,92	0,92	1,07	0,71	0,89
2008	0,75	0,75	0,79	0,79	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,90	0,75	0,90	0,90	1,01	0,75	0,80
2009	0,77	0,81	0,81	0,81	0,77	0,77	0,77	0,81	0,81	0,97	0,77	0,97	0,97	1,19	0,77	0,85
2010	0,81	0,80	0,90	0,90	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,90	0,81	0,90	0,90	1,13	0,81	0,86
2011	0,86	0,82	0,88	0,88	0,86	0,86	0,86	0,82	0,82	0,94	0,86	0,94	0,94	1,20	0,86	0,89
2012	0,87	0,83	0,86	0,86	0,87	0,87	0,87	0,83	0,83	0,94	0,87	0,94	0,94	1,29	0,87	0,90
2013	0,90	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,85	0,85	0,96	0,81	0,96	0,96	1,29	0,81	0,92
2014	0,94	0,87	0,91	0,91	0,94	0,91	0,94	0,87	0,87	1,00	0,94	1,00	1,00	1,30	0,91	0,95
2015	0,95	0,90	0,89	0,89	0,95	0,89	0,95	0,90	0,90	1,01	0,95	1,01	1,01	1,15	0,89	0,95
2016	0,90	0,88	0,85	0,85	0,90	0,85	0,90	0,88	0,88	0,93	0,90	0,93	0,93	1,02	0,85	0,90
2017	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2018	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2019	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2020	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2021	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2022	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2023	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2024	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2025	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2026	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2027	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2028	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2029	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91
2030	0,92	0,89	0,88	0,88	0,92	0,88	0,92	0,89	0,89	0,92	0,92	0,92	0,92	1,07	0,88	0,91

Fonte: Elaborado a partir de (FIRMO; RODRIGUES, 2006) e SNIS (2006 a 2017)

Legenda

1	até 30.000 hab.
2	de 30.001 à 100.000 hab.
3	de 100.000 à 250.000 hab.
4	de 250.001 à 1.000.000 hab.
5	de 100.001 à 3.000.000 hab.
6	acima de 3.000.001 hab.

3.3.3.3 Total de resíduos sólidos urbanos dispostos

A quantidade de resíduos urbanos dispostos no solo foi determinada considerando três períodos distintos:

- a) de 2005 a 2006, para o qual se tomou como base os dados utilizados do 1º Inventário Nacional em 2005 (FIRMO, 2009), para os municípios da RMR;
- b) de 2007 a 2018, dados obtidos em estudos e disponibilizados pelos municípios e pelas centrais de tratamento ou projeção (IBGE, 2000 a 2010) e taxa per capita do SNIS 2006 a 2017;
- c) de 2019 a 2030, dados projetados em função da população (IBGE, 2010 - 2019) e a taxa per capita da geração de resíduos por habitante, disponível no Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento de 2017 (SNIS, 2017).

Os quais foram utilizados da seguinte forma:

- a) **Municípios do Sul Metropolitano:** Jaboatão dos Guararapes, Recife, Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca.

Para Recife e Jaboatão dos Guararapes 2006, os dados projetados do 1º Inventário Nacional de GEE (FIRMO, 2009), e de 2007 em diante os disponibilizados pela Central de Tratamento Candeias - CTR Candeias.

Para o Cabo de Santo Agostinho, que utilizou o lixão de Pista Preta de 2006 a 2007, foram utilizados os dados projetados para o 1º Inventário Nacional de GEE (FIRMO, 2009) e a geração per capita (SNIS, 2006 a 2007) e de 2008 em diante os dados da CTR Candeias, onde passou a dispor os resíduos.

Para o município de Ipojuca que fez a disposição em lixão, no período de 2006 a 2012, foram utilizados os dados projetados e a geração per capita (SNIS, 2006 a 2012). Em 2013 o lixão foi transformado em aterro controlado, operando dessa forma até 2018. Os dados foram disponibilizados pelo município, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Quantidade de RSU dispostos no aterro controlado de Ipojuca (2013/2018)

Ano	(t/ano)
2013	36.929,62
2014	41.718,37
2015	40.642,17
2016	42.242,57
2017	40.947,24
2018	43.855,39
Total	276.356,49

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Ipojuca (2019)

b) **Municípios do Norte Metropolitano:** Abreu e Lima, Araçoiaba, Itapissuma, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Olinda e Paulista.

Para Abreu e Lima, Araçoiaba, Itapissuma, Igarassu e Ilha de Itamaracá, que fizeram a disposição em lixões, de 2006 até o encerramento dos mesmos, foram utilizados os dados projetados para o 1º Inventário Nacional de GEE (Firmo, 2009). Após o encerramento dos respectivos lixões, foram utilizados dados disponibilizados pela CTR Pernambuco, local em que esses municípios passaram a dispor os resíduos.

Para o município de Olinda, de 2006 a julho de 2010 admitiu-se os dados do projeto executivo para o aterro sanitário (ATEPE/GRS/PMO, 2010) (Tabela 17), e a partir de agosto 2010 os dados disponibilizados pela CTR Pernambuco.

Tabela 17 - Quantidade de resíduos admitidos para o aterro controlado de Aguazinha /Olinda (2006/2010)

Ano	Resíduos de Podação	Resíduos Volumosos	Resíduos Urbanos
	(t/ano)	(t/ano)	t/ano)
2006	3.043,78	27.403,17	62.459,14
2007	3.850,68	24.803,28	89.394,55
2008	3.823,80	36.933,01	90.227,93
2009	3.988,54	30.423,87	91.461,93
jul/10	4.634,17	17.508,38	58.108,53
Total	35.508,40	331.517,22	858.094,84

Fonte: ATEPE/GRS/PMO (2010)

O município de Paulista teve os seus resíduos dispostos no lixão da Mirueira, de 2006 a 2008, tendo sido considerados os dados projetados para o 1º Inventário

Nacional de GEE (FIRMO, 2009). De 2009 a agosto de 2013, os dados de resíduos foram disponibilizados pela CTR Candeias, e a partir de setembro de 2013 os dados foram disponibilizados pela empresa I9 Gestão de Resíduos Sólidos (PPP) e pela CTR PE (Tabela 18).

Tabela 18 - Quantidade de resíduos admitidos para Paulista (2009 a 2018)

Ano	CTR /Candeia (t/ano)	I9* - CTR /PE (t/ano)
2009	22.969,56	-
2010	65.856,23	-
2011	82.716,31	-
2012	23.743,73	65.960,01
2013	64.274,97	32.218,34*
2014	-	94.709,00*
2015	-	88.998,10
2016	-	88.729,66
2017	-	86.069.160
2018	-	94.139,080
Total	259.560,80	554.855,42

Fonte: Elaborado a partir de CTR /Candeia, I9* - CTR /PE (2018)

c) **Municípios do Oeste Metropolitano:** São Lourenço da Mata, Moreno e Camaragibe.

Para o município de Camaragibe, de 2006 a 2011 utilizou-se os dados projetados para o 1º Inventário Nacional de GEE (Firmo, 2009) e a partir de 2012 os dados disponibilizados pelo município (Tabela 19).

Tabela 19 - Quantidade de resíduos admitidos para Camaragibe (2012 a 2018)

Ano	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
T	26.588,40	35.322,83	39.690,99	42.094,68	40.987,51	37.892,28	40.997,78

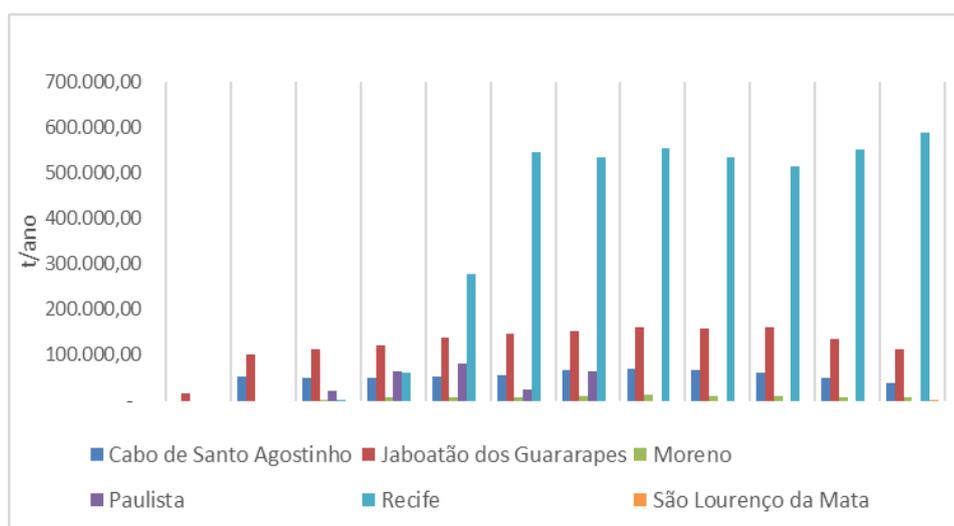
Fonte: Elaborado a partir de Município de Camaragibe (2019)

O município de Moreno, de 2006 a 2007, os dados do aterro controlado de Muribeca, e a partir de 2008 os dados disponibilizados pela CTR Candeias.

Para o município de São Lourenço da Mata, que fez uso do lixão durante todo período da pesquisa, 2006 a 2007, foram utilizados os dados projetados para o 1º Inventário Nacional de GEE (Firmo, 2009) e, no período de 2008 a 2017, dados projetados a partir da geração per capita do SNIS (2006 a 2017), e em 2018 o dado informado pelo município foi 26.940,96 t/ano dispostos na CTR Candeias.

Na figura 29 estão representados os dados da quantidade de resíduos dispostos informada pela CTR Candeias e o município-origem, no período de 2007 a 2018.

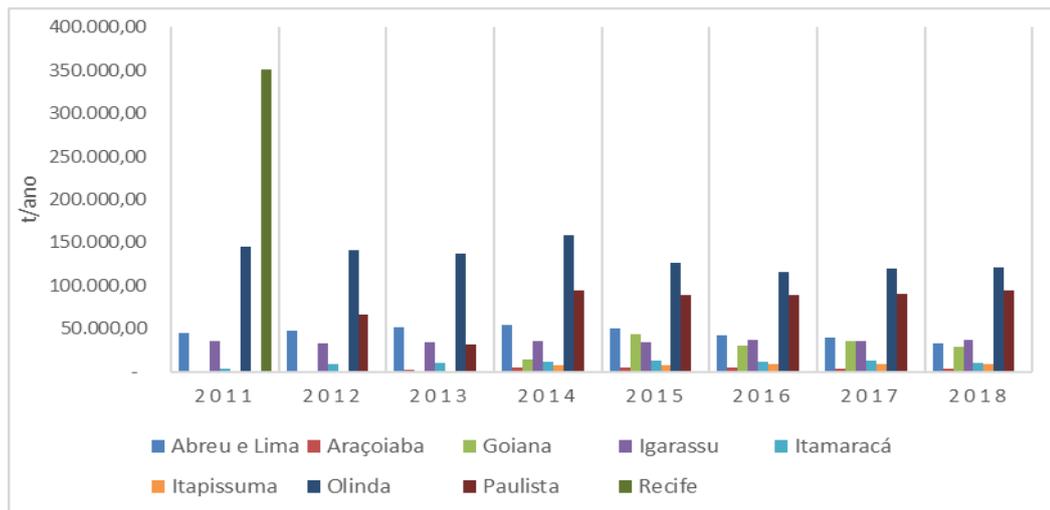
Figura 29 - Resíduos dispostos na CTR Candeias (2007 a 2018)



Fonte: CTR Candeias (2019)

Na Figura 30 estão representados os dados dos resíduos dispostos informados pela CTR Pernambuco em cada município gerador.

Figura 30 - Resíduos dispostos na CTR PE (2011 a 2018)



Fonte: Adaptados de CTR PE (2019)

A projeção da quantidade de resíduos gerada foi calculada, conforme Equação 13 (IPCC,20060.

$$MWS_{(t)} = \text{População} * \text{Geração per capita de resíduos} \quad (13)$$

Onde:

$MSW_{(t)}$ – Quantidade total de resíduos gerados no ano em estudo (t/ano)

Para projeção de população urbana, foi utilizada a fórmula:

$$Pop a = Pop b * (1 + i)^{b-a} \quad (14)$$

$$i = (Pop b / Pop a)^{1/(b-a)} - 1 \quad (15)$$

Sendo:

Pop a: É a população urbana estimada no ano α (residente em domicílios particulares e permanentes em áreas urbanas);

Pop b: É a população urbana (residente em domicílios particulares e permanentes em áreas urbanas) relatada pelo Censo do IBGE em um ano b);

i: Taxa média geométrica para incremento populacional anual;

b:Ano do Censo do IBGE;

a: Ano para qual se queira estimar a população.

3.3.3.4 Parâmetros importantes para o modelo IPCC, 2006

a) Constante de geração de metano – k

A constante k define o tempo para que o DOC decaia para a metade da sua massa inicial. Para o cálculo levou-se em consideração valores default recomendados pelo IPCC (2006) considerando-se a pluviometria (P) para clima tropical, que é o classificado para a RMR, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Valores recomendados para o tempo de meia vida ($t_{1/2}$) e para a constante cinética de decaimento (k)

RSU/Clima tropical	P ≥ 1000 mm/ano		P < 1000 mm/ano	
	Default	Faixa	Default	Faixa
$t_{1/2}$	4	3 – 5	11	9 – 14
K	0,17	0,15 – 0,2	0,065	0,05 – 0,08

Fonte: IPCC, 2006

b) Fator de correção do metano (MCF)

O MCF refere-se ao gerenciamento dos locais de disposição dos RSU. Para definição do mesmo foi feita a correlação entre as categorias de disposição de resíduos preconizadas pelo IPCC (2006) e PNRS (2010), conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Valores recomendados para o fator de correção do metano (MCF)

IPCC, (2006)	PNRS (2010)	Fator – MCF (adimensional)
Com gerenciamento	Aterro sanitário	1,0
Profundo > 5 m	Aterro Controlado	0,8
Raso < 5m, sem gerenciamento	Lixão	0,4
Não categorizado	Destino não informado	0,6

Fonte: Adaptado de IPCC (2006) e PNRS (2010)

c) Carbono orgânico degradável (DOC)

O valor do carbono orgânico degradável, que é a quantidade de material passível de ser decomposto, para a determinação do potencial de geração de gás dos resíduos decomposto, e assim determinará a quantidade de emissões de gases de efeito estufa. Para tanto tomou-se como base os dados de composição

gravimétrica dos resíduos dispostos na RMR e sua relação com a fração de carbono orgânico degradável, conforme Equação 8 (IPCC, 2006).

Para efeito de cálculos da geração de gás, nesta pesquisa, foram analisadas três condições de entrada no modelo do IPCC (2006), considerando o DOC e k - constante cinética de decaimento, para os componentes gravimétricos atribuídos pelo IPCC (2006), valores máximos default da faixa recomendada, o default do IPCC (2006) e os valores otimizados, obtidos por FIRMO (2013), na RMR, conforme apresentados na Tabela 22.

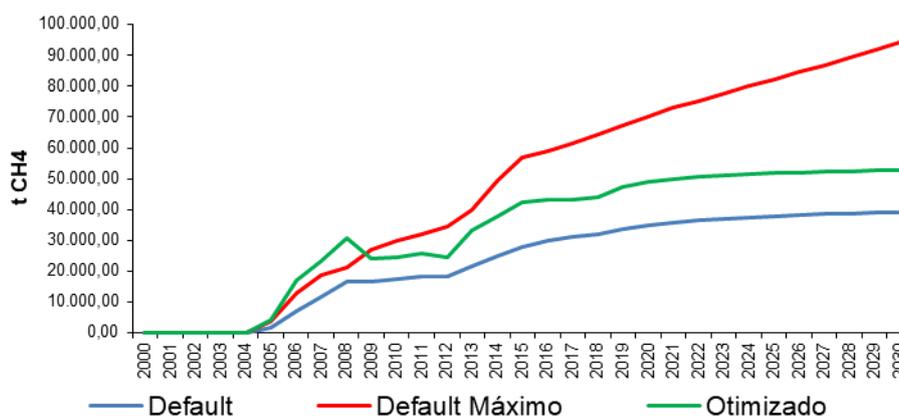
Tabela 22 - Dados de entrada do modelo do IPCC (2006)

Componentes	Faixa Recomendada		Default		Otimizado	
	DOC	K	DOC	K	DOC	K
Matéria orgânica	0,08-0,20	0,17 – 0,70	0,15	0,40	0,20	1,40
Papel/papelão	0,36-0,45	0,06 – 0,085	0,40	0,07	0,45	0,10
Madeira	0,39-0,45	0,035 – 0,05	0,43	0,035	0,46	0,05
Sanitários	0,18-0,32	0,15 – 0,20	0,24	0,17	0,32	0,20
Têxteis	0,20-0,40	0,06 – 0,085	0,21	0,07	0,40	0,085

Fonte: FIRMO (2013)

Optou-se pela utilização dos valores obtidos no modelo otimizado tendo em vista que, além dos dados terem sido gerados experimentalmente em aterro na RMR, tais valores são relevantes quando comparados com os default e default máximo do IPCC, apresentando um desvio de aproximadamente 10%. Na Figura 31, está demonstrado o comportamento das 03 opções estudadas.

Figura 31 - Comparação dos valores de entrada no modelo do IPCC na RMR



Fonte: A autora

d) Composição gravimétrica

O levantamento gravimétrico da região, no caso da pesquisa, é fundamental para a determinação do DOC, que é a quantidade de material passível de ser decomposto para a determinação do potencial de geração de gás dos resíduos biodegradados.

Nesta pesquisa foram adotados os componentes admitidos pelo IPCC, quais sejam: papel/papelão e resíduos alimentares, considerados rapidamente degradáveis; os resíduos têxteis e de madeira incluindo, a poda, considerados moderadamente degradáveis; e os resíduos sanitários, composto basicamente por fraldas, assim como os demais materiais inertes, como: concreto, cinza, solo, metais, plásticos, vidros e outros foram considerados muito lentamente degradáveis ou não passíveis de decomposição.

Os dados gravimétricos utilizados constam na Tabela 23, elaborada a partir de dados determinados conforme as NBR 10007/2004, por Tavares, (2018) e em estudos desenvolvidos anteriormente para a área.

Tabela 23 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos da RMR/PE

Municípios	Rapidamente degradável		Moderadamente degradável		Lentamente degradável	
	Papel Papelaão	Resíduos Alimentares	Madeira	Têxteis	Resíduos Sanitários	Inertes e Rejeitos
Abreu e Lima ¹	6,6%	34,70%	3,10%	5,38%	12,55%	37,66%
Araçoiaba ¹	5,13%	43,86	0,75	4,53	9,55	36,18
Cabo de Santo Agostinho ²	1,30%	71,10%	0,00%	1,50%	2,90%	23,20%
Camaragibe ⁴	9,00%	18,20%	3,00%	5,40%	10,20%	54,20%
Goiana ⁵	8,50%	62,80%	0,00%	0,00%	0,00%	28,70%
Igarassu ¹	10,49%	36,47%	6,78%	3,07%	10,62%	32,57%
Ipojuca ¹	3,07%	45,56%	1,25%	2,91%	7,91%	39,30%
Ilha de Itamaracá ¹	11,24%	54,25%	12,81%	5,18%	6,92%	9,60%
Itapissuma ¹	8,11%	49,30%	14,07%	11,08%	11,75%	5,69%
Jaboatão dos Guararapes ²	7,80%	62,30%	7,80%	4,60%	4,00%	13,50%
Moreno ²	2,80%	54,60%	8,50%	5,10%	9,70%	19,30%
Olinda ¹	17,06%	43,14%	12,68%	0,72%	14,48%	11,92%
Paulista ¹	15,24%	36,16%	0,00%	4,99%	11,14%	32,47%
Recife ²	5,00%	62,80%	10,10%	3,30%	3,90%	14,90%
São Lourenço da Mata ³	10,00%	54,20%	3,00%	0,00%	0,00%	32,80%
Média da RMR	8,09%	48,63%	5,59%	3,85%	7,71%	26,13%

Fonte: Adaptado a partir de 1 – Tavares, 2018; 2 - SECID 2014: Baseado em dados da CTR Candeias, 2012; 3 - Engeconsult /Prefeitura de São Lourenço da Mata, 2014; 4 - PGIRS/Prefeitura de Camaragibe, 2015; 5 – PERS 2012

e) Fração do DOC degradável (DOC_f) (adimensional)

Parâmetro com valor default recomendado pelo IPCC (2006) de 0,5.

f) Fração de metano no biogás (F) (adimensional)

Para aterro sanitário foi utilizado o parâmetro valor default do IPCC (2006) de 0,5 e para os lixões e aterro controlado, 0,4.

g) Razão de conversão de carbono (C) para metano (CH₄) – 16/12

h) Fator de recuperação de metano (R).

A variável R é referente à recuperação de metano, por meio da queima ou aproveitamento energético. Considerou-se que um dos dois aterros sanitários existentes na RMR, tem um projeto de MDL, com a captura dos gases pela queima centralizada em flare.

Para efeito dessa pesquisa foram utilizados os dados do Project Design Document – PDD, UNFCCC (2011), período de 2012 a 2018 (Tabela 3.8). Tal decisão se fundamentou com a comparação dos dados obtidos no monitoramento

do Projeto de MDL para o ano de 2016, UNFCCC (2016), com os do PDD (2011), onde foi verificado que os dados estimados para 2016 e os obtidos apresenta uma diferença de apenas 1,3% (Tabelas 24 e 25).

Tabela 24 - Valores estimativos da reduções de CO₂e do PDD (2011 a 2018)

Ano	Estimativa de emissões da base (tCO ₂ e) PDD	Estimativa de emissões da atividade do projeto(tCO ₂ e)	Estimativa das reduções emissões(tCO ₂ e)	Estimativas de metano evitado(t/ano)
2011	40.136	44	40.091	1.604,00
2012	130.709	106	130.603	5.224,00
2013	143.649	106	143.543	5.741,72
2014	153.630	106	153.524	6.140,96
2015	161.540	106	161.434	6.457,36
2016	167.980	106	167.874	6.714,96
2017	180.779	106	180.673	7.226,92
2018	108.103	62	108.041	4.321,64
Total	1.086.526	742	1.085.783	43.432

Fonte: Adaptada de: CDM-PDD-FORM UNFCCC (2011)

Tabela 25 - Valores obtidos no monitoramento do projeto MDL (2016)

Mês	Baseline das emissões da base (tCO ₂ e) PDD	Resultado das emissões da atividade do projeto(tCO ₂ e)	Reduções globais de emissões (tCO ₂ e)	Metano recuperado/evitado (t/ano)
01/2016	20,414	18,0	20,396	0,8158
02/2016	17,765	16,0	17,749	0,7105
03/2016	19,765	17,0	19,764	0,7905
04/2016	18,597	16,0	18,581	0,7432
05/2016	20,180	16,0	20,164	0,8065
06/2016	20,456	16,0	20,440	0,8176
07/2016	20.385	16,0	20,369	0,8147
08/2016	20,940	17,0	20,923	0,8369
Total	158,518	132	158,386	6.337

Fonte: Adaptado de: CDM-PMR – UNFCCC (2016)

Para o aterro sanitário sem queima de gás, aterro controlado e lixões o fator de recuperação é nulo.

i) Fator de Oxidação (OX)

Para o Fator da quantidade de CH₄, que sofre oxidação no solo ou no material de cobertura, foram utilizados os valores recomendados pelo IPCC (2006), (Tabela 26).

Tabela 26 – Valores para o Fator de Oxidação (IPCC,2006)

Tipo de disposição	Fator
Aterro sanitário	0,1
Aterro controlado	0
Lixão	0

Fonte: IPCC (2006)

j) Classificação das constantes em função da Composição gravimétrica

A classificação das constantes utilizadas no modelo do IPCC, 2006, por componente gravimétrico, encontram-se na Tabela 27.

Tabela 27 - . Classificação das constantes por componentes gravimétrico

Composição fração de gás metano	DOC	DOCf	t1/2	K		F
Matéria Orgânica	0,20	0,79	2,00	1,40		0,50
papel/papelão	0,45	0,79	2,00	0,10		0,50
madeira	0,46	0,79	2,00	0,05		0,50
Sanitários	0,32	0,79	2,00	0,20		0,50
Têxtil	0,40	0,79	2,00	0,085		0,50
Outros	0,00	0,79	2,00	0,00		0,50

Fonte: adaptado de: IPCC (2006), Firmo (2013)

k) Quantidade CO₂ equivalente (tCO₂e)

O tCO₂e é a quantidade de metano emitido convertido em tCO₂e, e para esse estudo foi considerando o Potencial de Aquecimento global (GWP) do Terceiro Relatório (IPCC, 2014), cujo valor é 28.

Desta forma, o tCO₂e total de dióxido de carbono equivalente é igual à quantidade total de metano x 28.

3.4 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS.

Os cenários de mitigação foram concebidos tomando-se como referência a definição do IPCC, (2000), segundo o qual: Cenários são imagens alternativas de como no futuro pode se desenvolver ferramentas apropriadas para análise e como forças motrizes podem influenciar os resultados futuros das emissões e avaliar as incertezas (IPCC,2000).

Neste sentido, foram definidos cenários com metas plurianuais acumulativas no horizonte temporal de 2006 a 2030, que permitiram analisar ações que poderiam contribuir no atingimento das metas da Contribuição Nacionalmente Determinada-NDC Brasileira, em conformidade do Acordo de Paris, (2015), em função da necessidade de reduzir as temperaturas globais em 1,5 °C /2 °C.

As metas de emissões foram estabelecidas tendo como referência o valor absoluto das emissões de 2005, ano do Primeiro inventário Brasileiro, em consonância com a NDC e ano base em 2018.

Para a definição dos cenários foram consideradas as metas do PNRS, as recomendações do MCTI, 2017 e propostas prioritárias de mitigação do Fórum Brasileiro de Clima – FBMC (FBMC,2018), que preveem para implementação da NDC brasileira ações relacionadas com a implementação das políticas de gestão de resíduos, como ampliação da coleta seletiva e segregação dos materiais recicláveis, orgânicos e rejeitos, da captação do metano (CH₄) emitidos nos aterros sanitários, assim como o seu aproveitamento energético.

Os cenários tiveram como premissa a evolução da população com base na taxa de crescimento do IBGE (2010; 2019), a geração per capita dos resíduos SNIS (2017) e rotas tecnológicas para tratamento e disposição dos resíduos sólidos urbanos.

As emissões de CO₂e de 2005 foram as reportadas do Relatório de Referência do Setor de Resíduos em Pernambuco, para compor o Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (FIRMO; RODRIGUES, 2006).

Neste estudo, considerando uma gestão dos RSU com baixa emissão de carbono na RMR, foram concebidos quatro cenários.

Esses cenários preconizam investimentos em infraestrutura, escolhas de rotas tecnológicas e operacionais, assim como instrumentos políticos e regulatórios, conforme prevista na NDC brasileira.

Neste contexto, pretende-se que os materiais recicláveis voltem à cadeia produtiva como matéria prima, dentro de uma solução que permitirá à sociedade reduzir os danos ao meio ambiente e fechar o ciclo de vida do produto (UE, 2014), como prevê a economia circular.

- a) Cenário Base: abrange políticas e medidas implementadas e adotadas na RMR. Tem como referência o período de 2006 a 2018, no qual a coleta seletiva é incipiente, a disposição dos RSU ocorreu inicialmente em 03 aterros controlados, de Muribeca, Aguazinha e Ipojuca e em 10 lixões existentes nos diversos municípios da RMR. E Posteriormente, com a instalação das Centrais de Tratamento, em 01 aterro com queima centralizada, na CTR candeias, e 01 aterro sem queima dos gases, na CTR Pernambuco.
- b) Cenário 1: abrange a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos como medidas de mitigação. Prevê a universalização da coleta em domicílios urbanos, incremento de 15% na coleta diferenciada, sendo aproximadamente 5 % da coleta seletiva dos resíduos recicláveis pelos municípios e cooperativas, 10% por meio de tratamento mecanizado para produção de CDR, e desvio de 5% da fração orgânica para compostagem, além da erradicação dos lixões e aterros controlados. Prevê ainda, a disposição dos resíduos em 03 aterros sanitários, sendo 02 aterros com aproveitamento energético, com previsão de 75% de redução de emissões e 01 com queima em flare com 50% de redução de emissões. Cenário com possibilidades reais de ser implantado no período de 2019 a 2025, tendo em vista os investimentos em curso pelas centrais de tratamento.
- c) Cenário 2: no qual, dando continuidade à implantação das metas da PNRS, ocorrerá a ampliação de desvio dos resíduos recicláveis para 25 % e desvio de 10% da fração orgânica, no período de 2026 a 2030, e a disposição em 03 aterros sanitários, com aproveitamento energético, implicando redução de 75% em cada um deles.
- d) Cenário 3: haverá a ampliação do desvio da fração orgânica em 50%, em 2030, em relação ao Cenário 2, com base na PNRS e necessidade de busca de alternativas de rotas tecnologia, devido à vida útil dos aterros.

Os cenários adotados estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Cenários adotados para mitigação de GEE na RMR

Cenário Base 2006 -2018	Cenário 1 2019 – 2025	Cenário 2 2026 –2030	Cenário 3 2026 -2030
Implantação da PNRS 03 aterros controlado 09 lixões 01 aterro sanitário com queima de gás centralizada 01aterro sanitário sem queima de gás	Complementação da PNRS Todos os municípios com disposição adequada dos RSU Lixões - 0 Aterro controlado – 0 02 Aterro sanitário com aproveitamento do CH ₄ – redução 75% 01 aterro com queima de gás– redução de 50% (Ipojuca)	Atendimento a PNRS Todos os municípios com disposição adequada Lixões – 0 Aterro controlado -0 03 aterros com aproveitamento energético dos resíduos, redução de 75%	Atendimento a PNRS Todos os municípios com disposição adequada Lixões/aterro controlado -0 03 aterros com aproveitamento energético dos resíduos, Disposição de 20%rejeitos
Desvio de materiais reciclados 3,5 %	Desvio de materiais reciclados 15%	Desvio de materiais reciclados 30%	Desvio de materiais reciclados
Desvio de orgânico 0,01%	Desvio da fração orgânica 5%	Desvio da fração orgânica do aterro 10%	Desvio da fração orgânica do aterro 50%
Emissões remanescentes	Emissões remanescentes		

Fonte: Autora (2020)

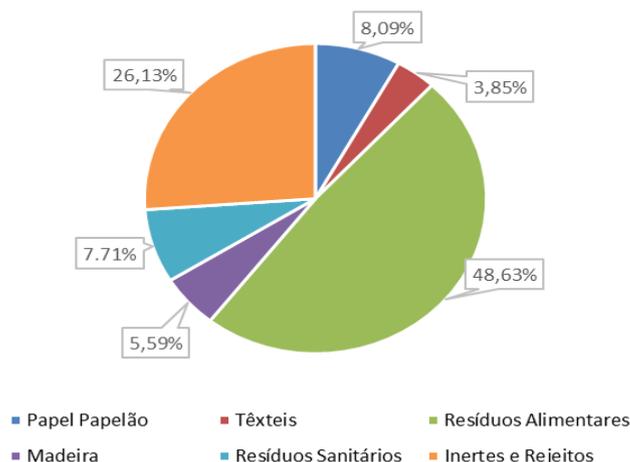
3.4.1 Parâmetros alterados nos cenários

Na definição dos cenários foram alterados os parâmetros: Fator de Correção do Metano (MCF) e Composição Gravimétrica.

O MCF, fator referente ao gerenciamento dos locais de disposições, foi alterado, uma vez que houve transição na destinação de lixões e aterros controlados para aterros sanitários.

A nova composição gravimétrica (Tabela 29) foi calculada a partir da média da RMR (Figura 32) e em função dos percentuais de redução dos materiais recicláveis e orgânicos atribuídos para cada cenário.

Figura 32 - Média da composição gravimétrica da RMR



Fonte: Autora (2020)

Tabela 29 - Composição gravimétrica em função dos cenários (%)

Cenários	Papel Papelão	Resíduos Alimentares	Madeira	Têxteis	Resíduos Sanitários	Inertes e Rejeitos
Cenário Base	8,09	48,63	5,59	3,85	7,71	26,13
C1 2019 -2025	6,88	46,20	5,31	3,27	7,71	30,63
C2 2026 - 2030	6,07	43,77	3,31	3,89	7,71	35,25
C3 2026 - 2030	6,07	21,89	1,66	3,89	7,71	41,22

Fonte: Autora (2020)

Foram utilizados, também, os percentuais admitidos pela ATEPE/GRS/UFPE/GIZ (2018) de redução de emissões de GEE para os aterros sanitários com queima em flare (50%) e com aproveitamento energético dos gases gerados (75%).

3.4.2 Metas de redução de emissões da NDC

Para o cálculo dos valores limites admissíveis para o teto das emissões, foi utilizada as metas prevista na NDC brasileira (MMA, 2015), cujas valores são os seguintes: 37% em 2025 e 43% em 2030, aplicados sobre o valor absoluto das emissões de 2005, reportado do 1º Inventário Brasileiro, considerando os municípios da RMR e corrigido pela métrica do PWG de 28.

3.5 SOFTWARES UTILIZADOS

Foram utilizadas planilhas em Excell: Waste Model (IPCC, 2006) apêndice I. Os mapas foram elaborados utilizando o Arcgis, nas versões 10.3, ano 2013, e 10.7, ano 2019 da ESRI. (<http://www.esri.com/software/arcgis>).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa, incluindo o diagnóstico situacional dos resíduos sólidos urbanos da RMR, as emissões emitidas, os resultados dos cenários para mitigação das emissões de GEE e a análise comparativas das emissões como NDC Brasileira.

4.1 DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O diagnóstico situacional dos resíduos sólidos urbanos da RMR, mais especificamente os resíduos domiciliares, tem como referência o período de 2006 a 2018.

4.1.1 A Gestão dos resíduos sólidos

A gestão integrada de resíduos sólidos na RMR busca a efetivação dos 3 RS definida no Plano Metropolitano de Resíduos Sólidos (2011) e revisado em 2018, cujos municípios estão geograficamente distribuídos em três aglomerados:

- a) O Norte Metropolitano, composto dos municípios de Abreu e Lima, Araçoiaba, Goiana, Ilha de Itamaracá, Igarassu, Itapissuma, Olinda e Paulista;
- b) O Oeste Metropolitano, formado pelos municípios de Camaragibe, Moreno e São Lourenço da Mata;
- c) Sul Metropolitano, abrangendo os municípios de Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes, Ipojuca e Recife.

O Sistema Metropolitano traz uma configuração para a gestão de forma que as unidades de manejo venham atender os requisitos da legislação vigente, prevendo a existência de unidades de triagem, estações de transbordo, unidades de compostagem e aterros sanitários energéticos, tendo a possibilidade do aproveitamento energético conforme o artigo 9º da PNRS (BRASIL, 2010).

Atualmente o sistema é composto por duas centrais de tratamento, a Central de Tratamento de Pernambuco, localizada em Igarassu, com vida útil estimada até

2032, com tratamento mecanizado e produção de combustível derivado de resíduos (CDR), estando em fase de instalação a unidade de geração de energia a partir do biogás do aterro sanitário. A Central de Tratamento Candeias, localizada em Jaboatão dos Guarapaes, com vida útil prevista até 2033, com geração de energia a partir do biogás. E o aterro controlado de Ipojuca, em processo de licenciamento ambiental para operar como aterro sanitário público. Foram elaborados estudos para a instalação de um aterro sanitário energético, no município de São Lourenço da Mata, no Oeste Metropolitano.

Existem 27 organizações de catadores de materiais reciclados, 01 estação de transbordo, diversos Pontos de entrega voluntária – PVs, e 02 unidades de compostagem tradicional sem aeração.

Os municípios possuem, na sua estrutura, órgão de gerenciamento dos serviços públicos. No entanto a operação da coleta convencional e o transporte na maioria dos municípios, é terceirizado. Na Figura 33, apresentam-se os locais de disposição dos resíduos em 2018.

Figura 33 - Locais de disposição dos RSU na RMR (2018)



Fonte: Autora (2020)

4.1.2 Geração de resíduos

A estimativa de geração de resíduos sólidos urbanos pressupõe a utilização de índices de geração *per capita* compatíveis à realidade de cada município. Na Tabela 30, são encontrados dados de população, resíduos domiciliares coletados e geração per capita dos resíduos em 2018.

Tabela 30 - População, RSU coletado e geração per capita (2018)

Municípios	População estimada - hab.	RSU coletado (t/ano)	Ger. per capita (Kg/hab/dia)
Abreu e Lima	99.622	33.089,44	0,91
Araçoiaba	20.312	6.524.21	0,88
Cabo de Santo Agostinho	205.112	65.133.32	0,87
Camaragibe	156.736	49.771.52	0,87
Goiana	79.455	26.370.97	0,91
Igarassu	115.640	36.721.48	0,87
Ilha de Itamaracá	25.836	8.298.52	0,88
Ipojuca	94.709	31.457.94	0,88
Itapissuma	26.390	8.478.72	0,88
Jaboatão dos Guararapes	697.636	231.719.79	0,91
Moreno	62.253	20.680.66	0,91
Olinda	391.835	132.147.95	0,91
Paulista	329.117	109.316.21	0,91
Recife	1.637.834	627.699,88	1,05
São Lourenço da Mata	112.362	35.680.55	0,87
RMR	4.054.866	1.423.091,16	0.91

Fonte: Elaborado a partir de: IBGE (2018) e SNIS (2017)

É necessário ponderar que o volume de resíduos sólidos gerados nas áreas urbanas não corresponde exatamente ao volume coletado. No entanto, tendo em vista que em todos os municípios da RMR a coleta ocorra quase a totalidade das áreas urbanas, 92% (SNIS, 2017), pressupõe-se, que todo o resíduo gerado seja coletado. No entanto, na prática não é bem assim.

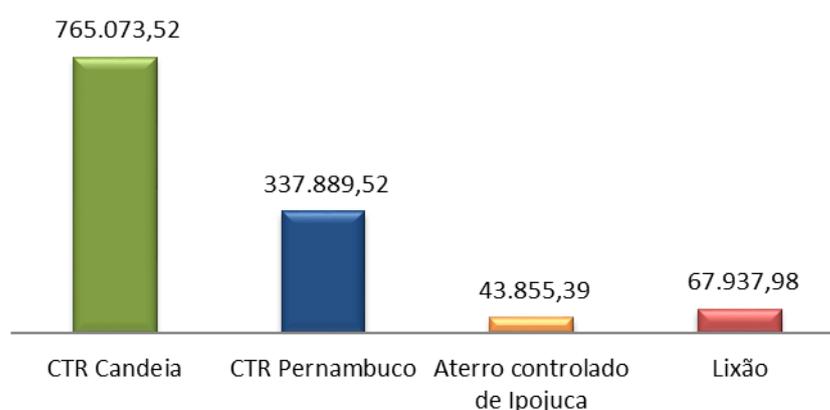
Desta forma, sabe-se que o volume de resíduo produzido é maior que o volume coletado e com disposição em aterro. Entretanto, não é fácil estimar esse volume e a disposição irregular acaba por subestimar a geração de resíduos por município.

Embora, nos municípios em que a coleta é mais eficiente e ocorre com maior regularidade, a massa de resíduos gerada e a quantidade coletada e disposta nos locais de aterramento se assemelham.

Neste contexto, considerando-se os dados da Tabela 30, a geração estimada para a RMR, em 2018, foi de 1.423.091,16 t/ano, onde o município do Recife, o mais populoso, com 40,4% da população, concentra aproximadamente 629.699,88 t/ano dos resíduos gerados na região. Seguida de Jaboatão dos Guararapes, cuja população representa 17,2%, com 321.719,79 t/ano, e Olinda, que gera aproximadamente 132.147,95 t/ano.

Por outro lado, segundo as informações disponibilizadas pelas centrais de tratamentos e municípios, a quantidade de resíduos dispostos no solo, no ano de 2018, foi de 1.214.756,41 t/ano, conforme pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 – Resíduos dispostos por categoria de manejo (t/ano)

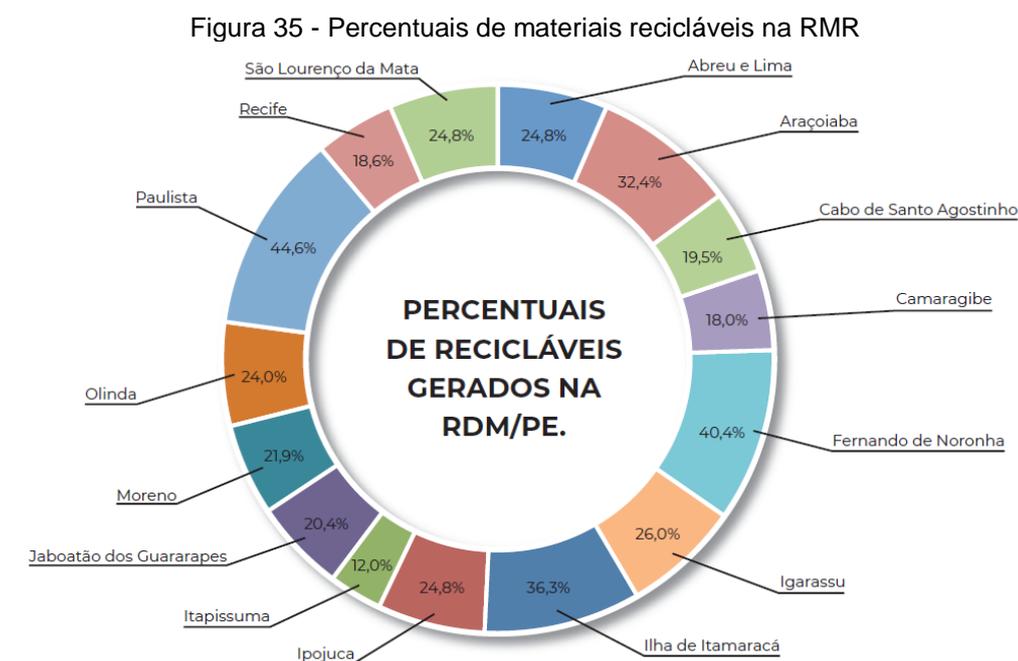


Fonte: Autora (2020)

De fato, em uma análise comparativa dos resíduos estimados em função da massa per capita, 1.423.091,16 t/ano em 2018, e os dispostos informados pelas centrais de tratamento e municípios, verifica-se que 85,36 % dos resíduos gerados, equivalente a 1.214.756,41t, tiveram sua disposição nas unidades de manejo na RMR, e que 14,64 %, equivalente a 208.334,35 t, se coletados, foram colocados em locais diversos daqueles estudados ou dispostos no solo aleatoriamente pela população.

4.1.3 Coleta seletiva e inclusão social dos catadores

A coleta seletiva praticada na Região Metropolitana do Recife - RMR em termos quantitativos é incipiente, estando estimado em 2 a 3,5 % do potencial de materiais recicláveis. A Figura 35, representa o potencial em termos percentuais de materiais recicláveis nos municípios da RMR.



Fonte: Pernambuco (2018b)

De acordo com levantamento realizado pelo Projeto Rescate, executado pela Secretaria de Trabalho, Emprego e Empreendedorismo, com apoio da Secretaria Nacional de Economia Solidária (Pernambuco, 2018a), existem 391 catadores de materiais recicláveis organizados em cooperativas e associações, e 3.183 não organizados, totalizando 3.574 catadores na RMR. Entre os municípios da RMR, apenas no lixão de Serro Azul, em Camaragibe, ainda ativado, foi constatada a presença de catadores.

Segundo o referido estudo a produção mensal em t/mês, das cooperativas/associações, representa um valor relativo médio de apenas 0,58% do potencial existente de materiais recicláveis na RMR, isto, considerando a estimativa da produção atual levantada diretamente nas cooperativas e associações (Projeto Rescate, PE(a) 2018) e a composição gravimétrica dos resíduos sólidos obtida no Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS, 2012), o que indica uma demanda

reprimida que possibilitará um avanço na coleta seletiva na RMR, sobretudo considerando o número de organizações existentes e com potencial de serem instituídas em função da quantidade de catadores e catadoras não organizadas, conforme pode ser observado na Tabela 31.

Ressalta-se que quando da pesquisa do Projeto Rescate, o município de Goiana estava recém-incluído na RMR, por força do Estatuto da Metrópole e, por este motivo, não tendo sido estudado.

Tabela 31 - Potencial máximo de recicláveis na RMR

ITEM	MUNICÍPIO	COMPOSIÇÃO FÍSICA (%) (PERS, 2012)			POTENCIAL RECICLÁVEIS (t/Mês)	PRODUÇÃO REAL DE RECICLÁVEIS (COOPERATIVAS E ASSOCIAÇÕES ORGANIZADAS)			
		RECICLÁVEIS	ORGÂNICA	REJEITOS		t/mês	(%)	DEMANDA REPRIMIDA (%)	PERCENTUAL SOB O TOTAL DE RS (%)
1	Abreu e Lima	24,80%	54,20%	21,00%	1.094	80,917	7,40%	92,6%	1,8%
2	Araçoiaba	32,30%	49,20%	18,50%	122	0	0,00%	100,0%	0,0%
3	Cabo de Santo Agostinho	20,90%	71,10%	7,90%	1.142	27,578	2,41%	97,6%	0,5%
4	Camargibe	18,00%	33,00%	49,00%	853	6,229	0,73%	99,3%	0,1%
5	Igarassu	18,00%	33,00%	49,00%	586	1,324	0,23%	99,8%	0,0%
6	Ilha de Itamaracá	26,00%	63,00%	11,00%	257	11,45	4,45%	95,6%	1,2%
7	Ipojuca	12,00%	13,00%	75,00%	490	10,77	2,20%	97,8%	0,3%
8	Itapissuma	24,80%	70,10%	5,10%	209	22,911	10,96%	89,0%	2,7%
9	Jaboatão dos Guararapes	24,80%	70,10%	5,10%	6.208	106,399	1,71%	98,3%	0,4%
10	Moreno	27,00%	63,30%	9,70%	332	0	0,00%	100,0%	0,0%
11	Olinda	24,00%	60,00%	16,00%	2.448	30,957	1,26%	98,7%	0,3%
12	Paulista	24,00%	60,00%	16,00%	2.530	9,779	0,39%	99,6%	0,1%
13	Recife	22,00%	72,90%	5,20%	17.036	227,072	1,33%	98,7%	0,3%
14	São Lourenço da Mata	24,80%	54,20%	21,00%	817	12,86	1,57%	98,4%	0,4%
TOTAL/MÉDIA		23,10%	54,79%	22,11%	2.437	548,246	2,47%	97,53%	0,58%

Fonte: Pernambuco (2018a)

Com relação à constituição de organizações de catadores e catadoras na RMR observou-se que houve uma evolução. Se em 2009 já existiam 15 associações, em 2016 este número cresceu de 25, e em 2019 passou para 27. As primeiras associações e cooperativas foram criadas no Cabo de Santo Agostinho (1997), a COONSERC e a ARO em Olinda (1999). As mais recentes foram a de Palha de Arroz, em 2016, cooperativa formada somente por mulheres, em Recife, e as de Moreno e Araçoiaba, formalizadas em 2019, com apoio das respectivas prefeituras.

No Quadro 7 encontram-se as cooperativas/associações em funcionamento na RMR, onde observa-se que existem catadores avulsos em todos os municípios.

Quadro 7 - Relação das cooperativas /associações na RMR

Município	Cooperativa/Associações materiais recicláveis	Catadores Avulsos
Abreu e Lima	Cooperativa de Catadores de Material Reciclável Erick Soares	SIM
	Cooperativa de Reciclagem de Plástico - Cooreplast	
Araçoiaba	Cooperativa de catadores de Materiais recicláveis de Araçoiaba – COOCARA	SIM
Camaragibe	Associação dos Catadores da Dignidade de Camaragibe -	SIM
Cabo de Santo Agostinho	Cooperativa Mista do Cabo	SIM
Goiana	Em constituição	SIM
Igarassu	Associação dos Catadores Dom Helder Câmara – Centro de Seletividade de Igarassu	SIM
Ipojuca	Associação dos Agentes de Reciclagem de Ipojuca	SIM
Ilha de Itamaracá	Associação dos Agentes Ecológicos e Recicladores da Ilha de Itamaracá	SIM
Itapissuma	Associação Padre Sevat	SIM
Jaboatão dos Guararapes	Cooperativa de Beneficiamento de Materiais Recicláveis dos Catadores Maria da Penha	SIM
	Cooperativa de Beneficiamento de Materiais Recicláveis dos Catadores de Curcurana	
	Cooperativa de Beneficiamento de Materiais Recicláveis de Catadores Nova Esperança de Vila Rica – Recicla Vila Rica	
	Cooperativa dos Catadores de Materiais Recicláveis Sítio Carpina	
Moreno	Cooperativa de Materiais Recicláveis de Moreno	SIM
Olinda	Associação dos Recicladores de Olinda – ARO	SIM
Paulista	Cooperativa de Catadores de Material Reciclável João Paulino – (COORJOPA)	SIM
	Associação União e Força – ASURF	
Recife	Cooperativa de Agentes de Gestão de Resíduos Sólidos – COOPAGRES	SIM
	Cooperativa “Esperança Viva”	
	Associação “Verde é a Nossa Vida”	
	Núcleo de Triagem “Catadores e Catadoras do Gusmão”	
	Núcleo de Triagem da Vila Santa Luzia	
	Cooperativa “Pró Recife”	
São Lourenço da Mata	Associação dos Catadores da Dignidade	SIM

Fonte: Autora (2020)

Em Jaboaão dos Guararapes, as cooperativas adotam o sistema de vendas em rede para comercialização conjunta da produção, de modo a alcançar os interesses das grandes indústrias e alguns grandes compradores de materiais recicláveis, que buscam escala no volume de materiais, o que vem contribuindo no aumento da renda mensal dos catadores.

Existem, na RMR, empresas cadastradas para realizar a comercialização de recicláveis com as cooperativas, ou seja, pode se considerar que o mercado para compra dos materiais está se consolidando

4.2 TRATAMENTO E DESTINAÇÃO FINAL

Na RMR, a gestão tem avançado em termo da disposição final, no entanto com relação ao tratamento e destinação final, apenas dos rejeitos, ainda é incipiente, uma vez que o processo de redução e reciclagem tem sido ainda modesto. Iniciativas de coleta seletiva estão presentes nos municípios, porém está estruturada nos municípios de Recife, Olinda, Jaboatão dos Guararapes e Abreu e Lima. Entretanto, o percentual segregado é muito baixo, não chegando a 3,5 % do potencial de materiais recicláveis.

4.2.1 Resíduos sólidos urbanos dispostos no solo

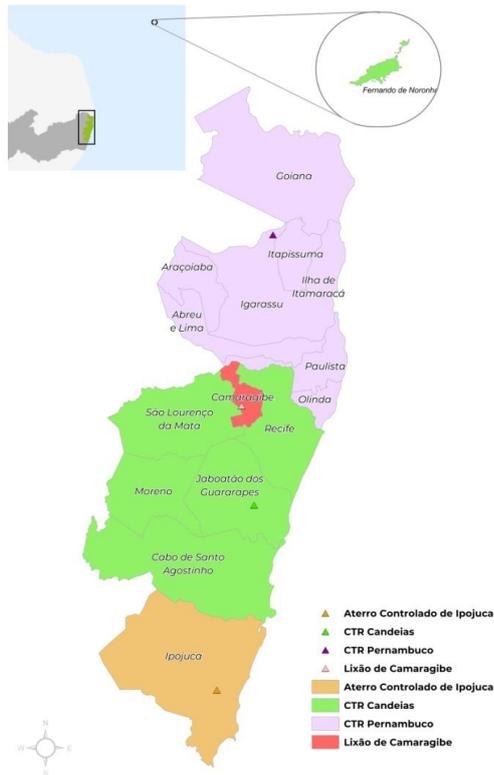
Em atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos a maioria dos municípios passou a fazer a destinação de resíduos sólidos em 02 aterros sanitários privados que atendem 13 dos 15 municípios da RMR. Os aterros sanitários estão inseridos em duas centrais de tratamento, a CTR Candeias, em Jaboatão dos Guararapes, e a CTR Pernambuco, em Igarassu.

Um município dispõe em aterro controlado próprio, que se encontra em processo de licenciamento ambiental para operar como aterro sanitário público.

E existe, ainda, um município que faz a destinação ainda em lixão a céu aberto.

Na figura 36 apresenta-se a localização da disposição de resíduos sólidos da RMR.

Figura 36 - Localização da disposição de RSU na RMR



Fonte: Pernambuco (2018)

Houve uma evolução na gestão dos RSU na RMR. Em 2009 existiam 09 lixões em operação, porém em 2018 estavam desativados 08 e apenas 01 ativo.

A Figura 37, apresenta a quantidade de municípios em função dos locais de disposição nos anos de 2009 e 2018, na RMR.

Figura 37 – Quantidade de município por locais de disposição (2009 e 2018)



Fonte: Autora (2020)

4.2.2 Quantidade de resíduos sólidos urbanos dispostos no solo

Para o método do IPCC (2006), a quantificação dos resíduos sólidos urbanos é fundamental no cálculo das emissões de gases de efeito estufa. Neste sentido foi feita solicitação formal às 02 (duas) Centrais de Tratamento e aos municípios sobre a quantidade de resíduos aterrados no período de 2006 a 2018. A Tabela 32, apresenta a quantidade de resíduos dispostos por tipo de disposição em 2018.

Tabela 32 – Quantidade de município por local de disposição na RMR

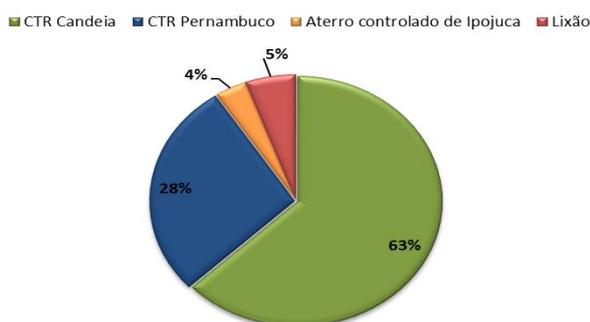
Tipo de disposição	Quantidade por municípios	Quantidade de resíduos dispostos t/ano
Aterro sanitário ¹	5,0	765.073,52
Aterro sanitário ²	8,0	337.889,53
Aterro público ³	1,0	43.855,39
Lixão ⁴	1,0	67.937,98
Total	15	1.214.756,41

1-CTR Candeias; 2- CTR Pernambuco; 3- Aterro controlado de Ipojuca; 4-Lixão de Camaragibe

Fonte: Autora (2020)

A Figura 38 representa os percentuais dos resíduos dispostos em cada unidade de tratamento, onde se verifica que na Central de Tratamento Candeias, em Jaboatão dos Guararapes, foram dispostos a maioria dos resíduos, ou seja, 63%, no entanto, apenas 5 dos 15 municípios depositam os seus resíduos nessa central. Vale salientar que Recife e Jaboatão dos Guararapes são os maiores geradores na RMR e utilizam a CTR Candeias.

Figura 38 - % de RSU por locais de disposição



Fonte: Autora (2020)

Ressalte-se que na Central de Tratamento de Pernambuco são dispostos 28%, no aterro público 5% e que 4% ainda são tratados de forma inadequada.

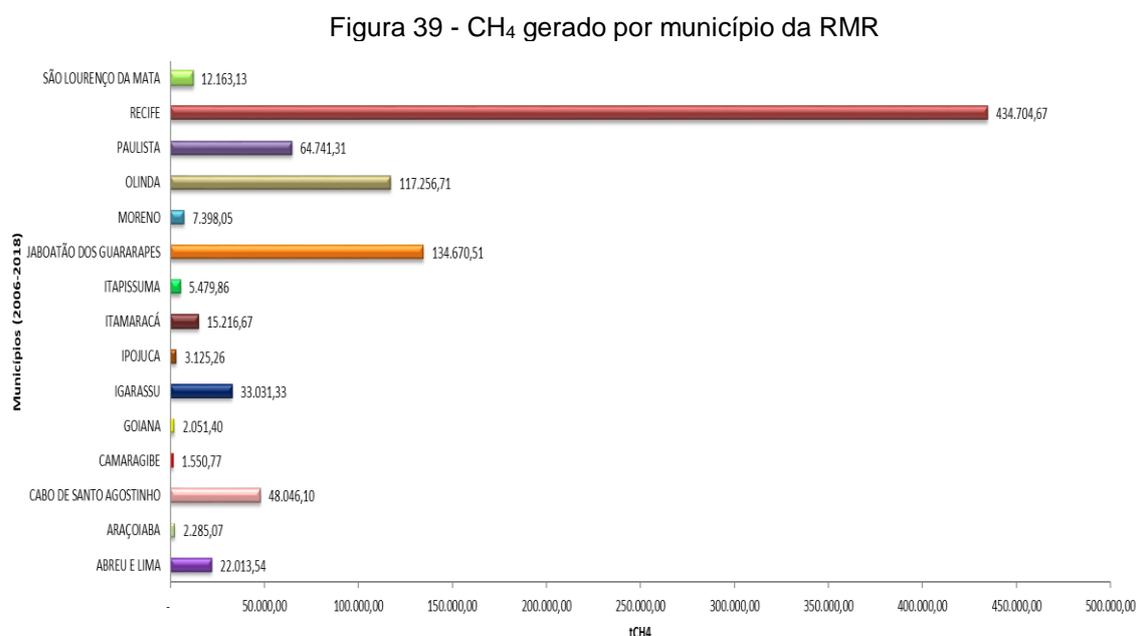
4.3 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados das estimativas de emissões geradas na Região Metropolitana do Recife, bem como, encontra-se a análise comparativa com a NDC Brasileira.

4.3.1 Estimativas das emissões por municípios da RMR

Na sua totalidade os municípios da RMR geraram, no período de 2006 a 2018, 903.734,40 t de CH₄, correspondente a 25.304.563,14 tCO₂e, tomando como base a métrica do Relatório AR5 do IPCC, no qual o potencial de aquecimento global (PWG) é 28.

A quantidade de metano gerado, distribuído por município, está representada na Figuras 39.

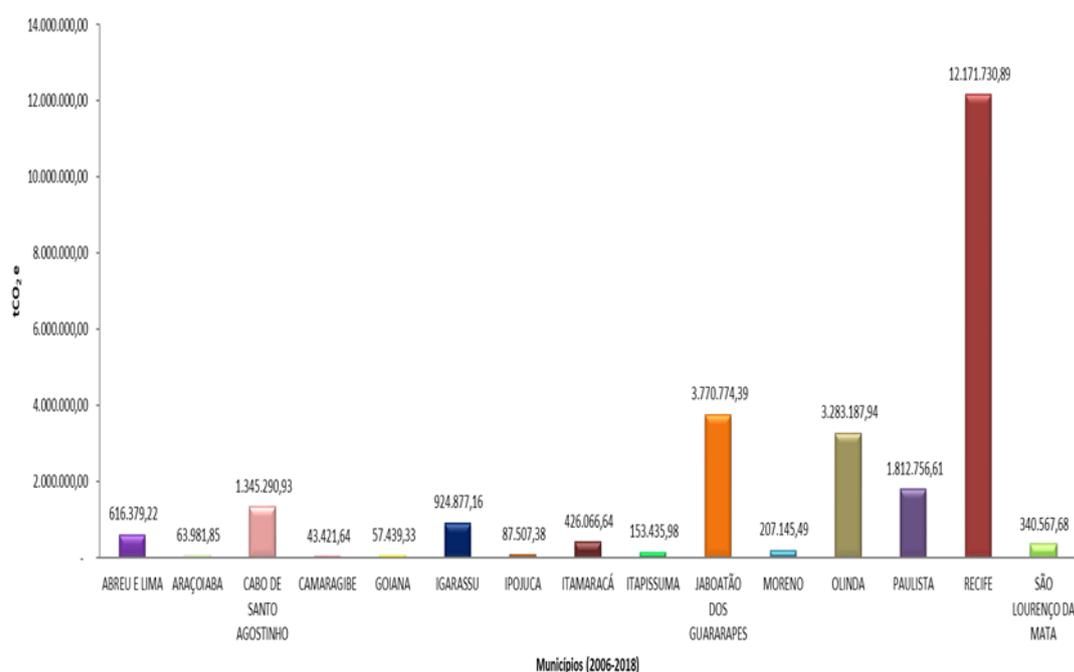


Fonte: Autora (2020)

Enquanto que na Figura 40 podem ser verificadas as emissões de Dióxido de carbono por cada município. Foi utilizado o Potencial de Aquecimento Global de 28,

segundo a métrica do Terceiro Relatório – AR5 do IPCC (2016). Na figura 40, demonstra-se que município de Recife, maior emissor, contribuiu com 12.171.731,89 t CO₂e, aproximadamente 4 vezes mais que Jaboatão dos Guararapes, o segundo colocado.

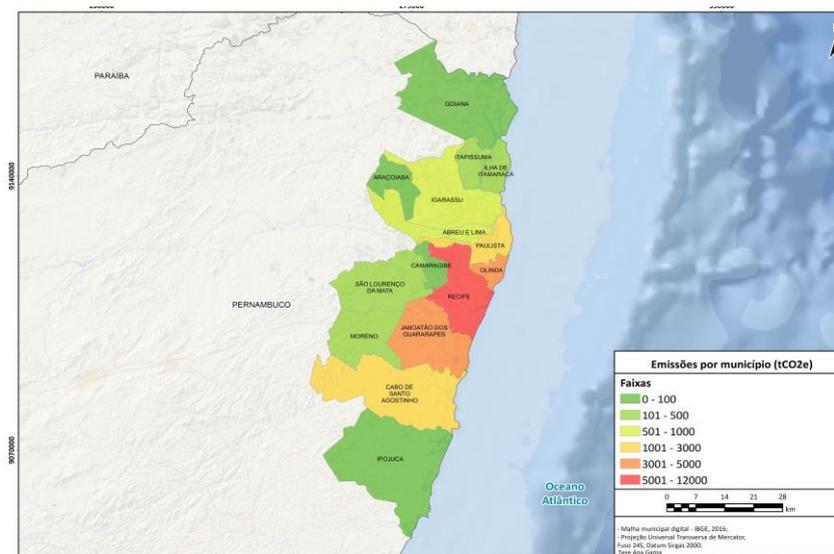
Figura 40 - Potencial de dióxido de carbono emitido na RMR



Fonte: Autora (2020)

As emissões por municípios por faixa de dióxido de carbono, estão apresentadas na Figura 41, na qual pode ser verificado que os Municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes e Olinda estão nas maiores faixas, em milhões de toneladas de CO₂e emitidas, no período de 2006 a 2018.

Figura 41 – Emissões por municípios da RMR por faixa de CO₂e (10³.tCO₂e)



Fonte: Autora (2020)

Em uma análise comparativa dos dados obtidos para o Inventário das Emissões de GEE em Pernambuco, realizado em 2019 pelo Estado, para o período de 2015 a 2018, e os obtidos nesta pesquisa, verifica-se que dos 16.103.982 tCO₂e emitidos em todo Estado, 65.75% são provenientes da RMR, que corresponde a 10.588.681,50 tCO₂e, para o mesmo intervalo de tempo de 5 anos.

4.3.2 Estimativas de emissões por locais de disposição

Neste subitem, serão apresentadas as estimativas das emissões por locais de disposição dos resíduos sólidos na RMR, no período de 2005 a 2018.

a) Lixões

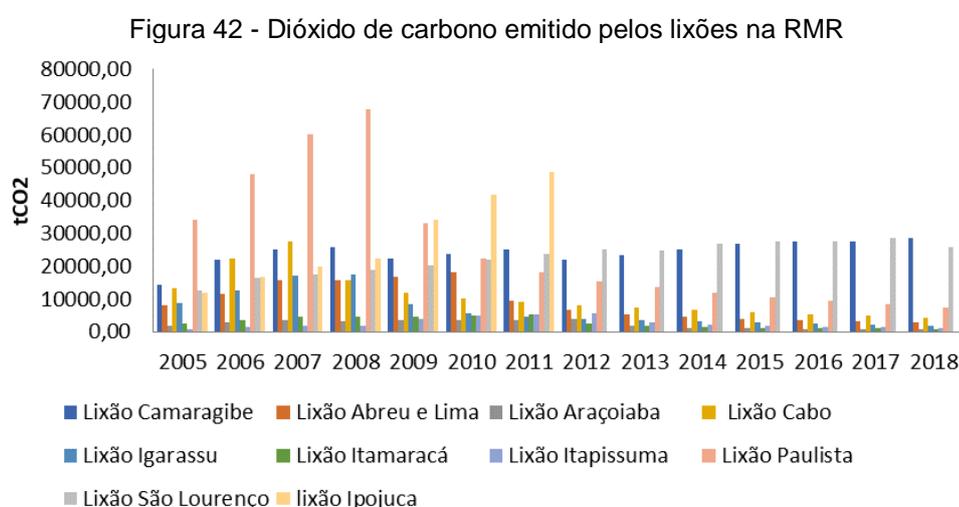
No levantamento realizado nas áreas de lixões, constatou-se que entre o período de operação e a data do encerramento dos mesmos houve uma variação nos resíduos dispostos.

O encerramento dos lixões se deu basicamente entre os anos 2008 a 2014, quando a maioria dos municípios buscou se adequar à Política Nacional de Resíduos Sólidos e desativaram os lixões.

Até o ano de 2017 dois municípios ainda dispunham seus resíduos a céu aberto, Camaragibe e São Lourenço da Mata (SLM), e, a partir de 2018, apenas Camaragibe continuou dispondo inadequadamente.

A Figura 42 apresenta a evolução nas emissões de dióxido de carbono, no período de 2005 a 2018, decorrentes dos lixões, na qual pode ser visto que apesar do encerramento da maioria dos lixões ter ocorrido por volta de 2014, as emissões continuaram e decresceram gradualmente até 2018.

Verifica-se que Paulista, Cabo de Santo Agostinho e Abreu e Lima foram os municípios que mais contribuíram no período. E que se o lixão de Camaragibe, ainda ativo, continuar, a tendência seria aumento nas emissões até 2030.



Fonte: Autora (2020)

No total, os lixões emitiram aproximadamente 1.10^6 tCO₂e, sendo 40% de Camaragibe, 18% Paulista, 17% São Lourenço da Mata e os 25% dos demais lixões.

Ressalte-se que Camaragibe envidou esforços para transformar o lixão em aterro controlado, no entanto não conseguiu operacionalizar, permanecendo como lixão ativo.

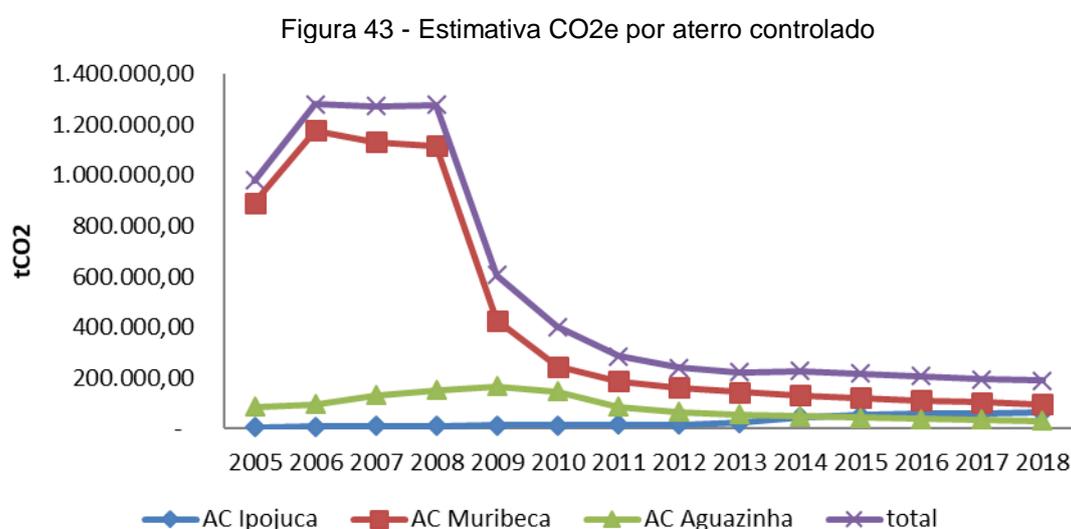
b) Aterros controlados

Com relação aos aterros controlados, basicamente existiam Muribeca em Jaboatão dos Guararapes, e Aguazinha em Olinda, que contribuíram na geração de aproximadamente 3.10^6 t/CO₂e e $0,8.10^6$ tCO₂e respectivamente no período de 2006

a 2018. Os dois aterros controlados receberiam os resíduos dos municípios mais populosos, como Recife, Jaboatão dos Guararapes e Olinda. O município de Ipojuca, em 2013, transformou o lixão em aterro controlado, que funcionou desta forma até 2018 e gerou aproximadamente $0,3 \cdot 10^6$ tCO₂e.

Os aterros controlados contribuíram com cerca de $4 \cdot 10^6$ tCO₂e.

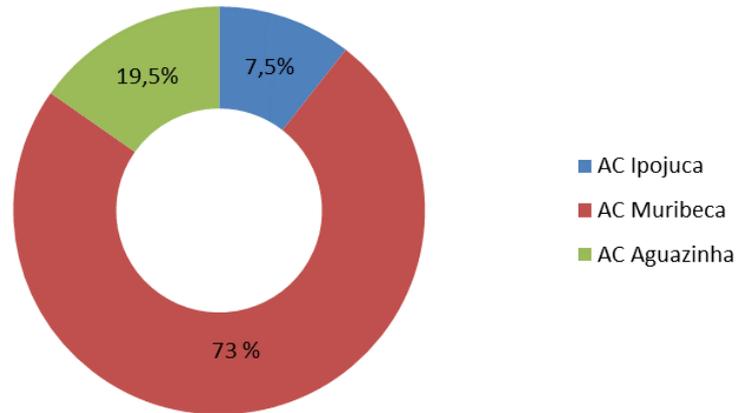
A Figura 43 apresenta a evolução nas emissões de dióxido de carbono, no período de 2005 a 2018, decorrentes dos aterros controlados, na qual pode ser visto que apesar do fechamento dos aterros controlados ter ocorrido entre 2007, caso de Muribeca, e 2013, Aguazinha, as emissões continuaram, porém com decréscimo gradual até 2018.



Fonte: Autora (2020)

O aterro controlado de Muribeca contribui com 73% das emissões dessa categoria de disposição, conforme a Figura 44.

Figura 44 – Percentual de CO2e por aterro controlado

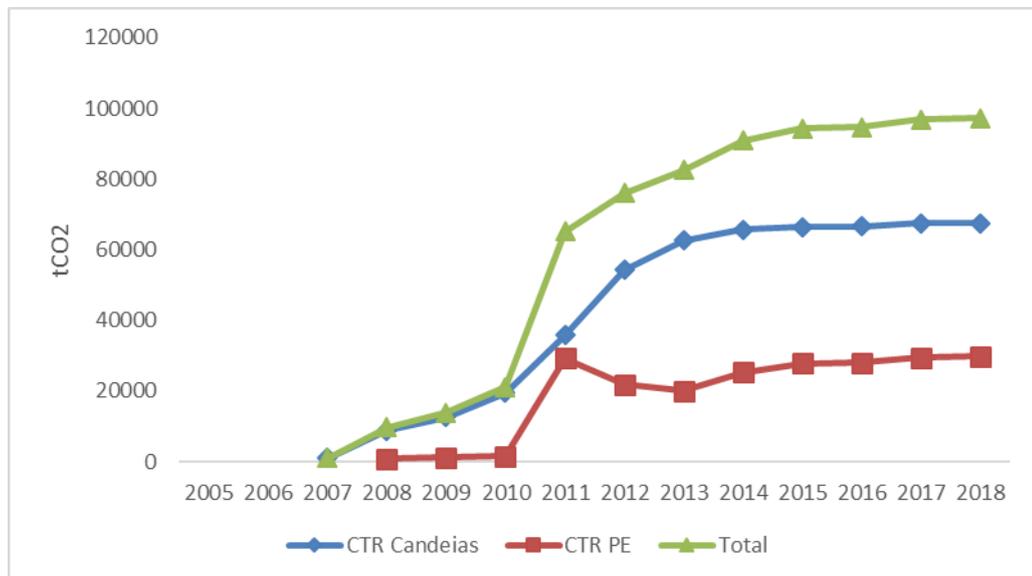


Fonte: Autora

c) Centrais de Tratamento Sanitário

As Centrais de Tratamento de Resíduos emitiram cerca de $20,8 \cdot 10^6$ tCO_{2e}, para o período 2006 a 2018, sendo que CTR Candeias responsável por $14,7 \cdot 10^6$ tCO_{2e}, e a CTR Pernambuco $6,0 \cdot 10^6$ tCO_{2e}. A Figura 45 contém os dados relativos às CTRs.

Figura 45 - Estimativa de emissões de dióxido de carbono por aterro sanitário

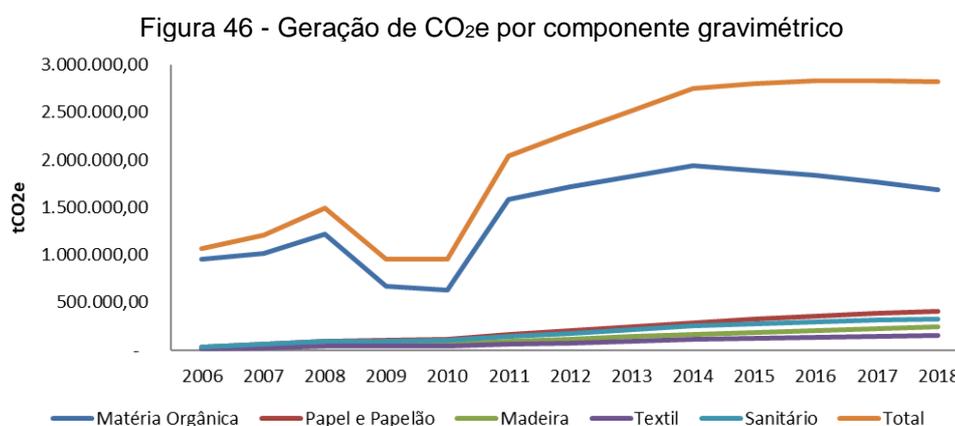


Fonte: Autora (2020)

Importante ressaltar que entre 2007 e 2011 foi a fase inicial de funcionamento das CTRs, na qual ocorreu a transição de lixões para aterro controlado e para aterro sanitário. Observou-se que houve uma variação na destinação dos resíduos, inclusive os municípios de Recife e Paulista alternaram a disposição entre CTR Pernambuco e Candeias, e proporcionaram oscilação nos resíduos dispostos informados pelas centrais.

4.3.3 Estimativa das emissões por componente gravimétrico

Para o cálculo da geração do gás metano, como dito anteriormente, foram utilizados padrões e coeficientes definidos no IPCC (2006) otimizados por FIRMO, (2013), dados específicos dos locais de disposição dos resíduos, e os componentes gravimétricos atribuídos pelo IPCC (2006). Na Figura 46, encontra a geração de CO₂e por componente na RMR, no período de 2006 a 2018.



Fonte: Autora (2020)

Pode-se observar, na Figura 46, que, dentre os componentes, a matéria orgânica se destaca pela quantidade de biogás gerada. Isso ocorre primeiro pelo alto percentual deste componente nos resíduos disposto e, segundo, pelo processo de biodegradação que se dá na medida em que a matéria orgânica contida nos RSU, quando depositada em condições de ausência de oxigênio livre (anaeróbica), sofre a ação de bactérias geradoras de metano, resultando na produção de biogás. Devido esse alto teor de gás e conseqüentemente das emissões de gases de efeito estufa, várias estratégias de mitigação poderiam ser utilizadas, que vai desde o aproveitamento energético a partir dos aterros sanitários, do desvio da fração

orgânica dos locais de disposição para compostagem, biodigestão ou mesmo a recuperação energética dos resíduos. Observa-se, também, uma variação na quantidade dos componentes no período de transição, entre a disposição em lixões e aterro sanitário, de 2007 a 2011.

4.3.4 Estimativas das emissões conforme cenários

As alternativas de mitigação foram estudadas a partir de cenários definidos, tomando como base o período de 2005 a 2030, tendo como objetivo avaliar a contribuição da RMR para o atingimento da NDC brasileira, no período de 2006 a 2030. Na Tabela 33 encontram-se as metas de emissões e os limites admissíveis da NDC Brasileira.

Tabela 33 - Metas de emissões e limites para NDC Brasileira (tCO₂e)

Inventário Brasileiro/RMR -	Emissões tCO ₂ e	Redução NDC		Limites admissíveis NDC	
		2025 37%	2030 43%	2025	2030
2005	1.559.264,00	576.927,68	670.483,52	982.336,32	888.780,48

Fonte: Autora (2020)

4.3.4.1 Cenário Base

O **Cenário base** foi projetado em função da taxa de crescimento populacional IBGE (2000 a 2010 e 2010 a 2019) e da geração per capita de resíduos (SNIS, 2006 a 2017), levando-se em consideração a situação da gestão dos resíduos sólidos na RMR, em 2018.

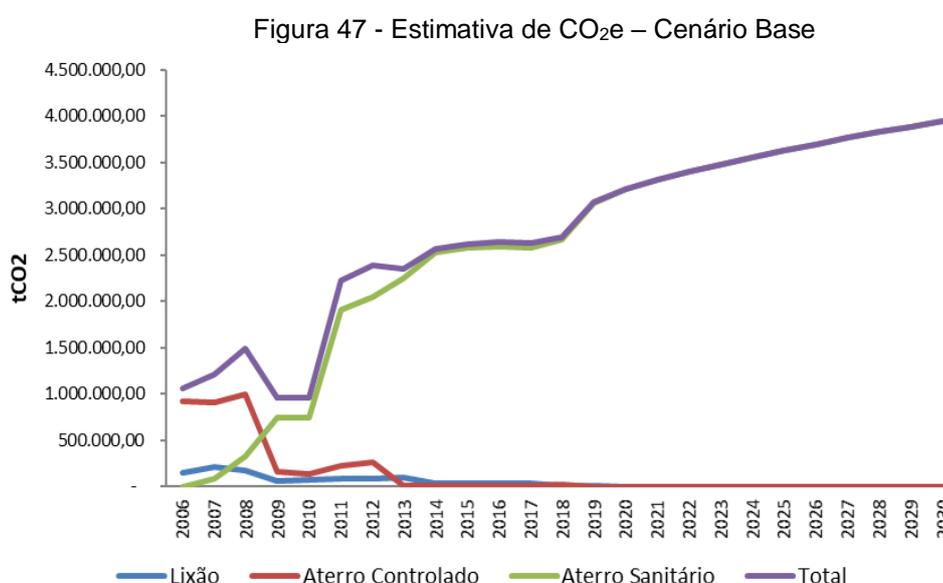
Importante destacar que em 2018 os municípios das RMR, à exceção de 01, já faziam a disposição dos resíduos adequadamente. Entretanto, com relação ao atendimento da PNRS, no quesito de que só deveriam ser encaminhados aos aterros os rejeitos, que são os resíduos inservíveis e sem valor econômico, fica distante de atendimento, uma vez que apenas aproximadamente 2,5 a 3% dos materiais recicláveis foram coletados.

Na Figura 47 está representada a evolução das emissões, considerando-se os locais de disposição na RMR, na qual verifica-se o decaimento das emissões nos

lixões e aterros controlados, e a tendência de crescimento do dióxido de carbono, ao longo do período estudado, em função da disposição nos aterros sanitários, confirmando a maior geração de biogás, por proporcionar melhores condições anaeróbias.

Verifica-se ainda que, com relação à tipologia de disposição dos resíduos urbanos, no período de 2006 a 2009, os aterros controlados foram os que mais contribuíram com a emissão de CO₂e (Figura 47).

Ressaltes-se que entre 2007 e 2008 foi o período de início de operação dos aterros sanitários, ocorrendo uma oscilação na disposição dos resíduos pelos municípios.



Fonte: Autora (2020)

A partir de 2009 houve incremento na disposição dos resíduos nos aterros sanitários, resultando uma geração maior dos gases entre 2011 e 2015, quando a maioria dos municípios passaram a dispor os seus resíduos nas Centrais de Tratamento da RMR.

Outro aspecto a ser ressaltado é que o período de transição da disposição inadequada ocorreu entre 2008 a 2011, tendo iniciado anteriormente à PNRS (BRASIL, 2010), colocaram a RMR na vanguarda da gestão dos resíduos em relação a outras regiões do Estado ou mesmo do país.

4.3.4.2 Estimativas das Emissões - Cenário 1

No **Cenário 1**, o temporal é de 2019 a 2025. Considera que a RMR, apresenta um status diferenciado em termo da gestão de resíduos, por ter aterros sanitários ambientalmente adequados, que apesar de não serem públicos, o que onera os municípios, atendem satisfatoriamente a demanda da região, admitiu-se a desativação dos lixões e que o aterro controlado de Ipojuca se transformaria em aterro sanitário.

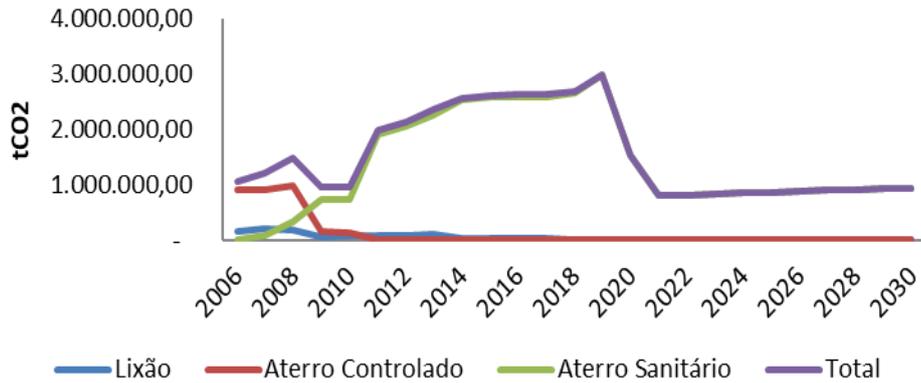
Outro aspecto considerado são os investimentos em infraestrutura por parte das Centrais de Tratamento, a exemplo da planta tratamento mecanizado e de produção de CDR existente que implica na redução dos materiais recicláveis nos aterros, e também a instalação de planta de recuperação dos gases dos aterros para a geração de energia.

Neste contexto, considerando-se o estudo GRS/UFPE para o Plansab, admitiu-se redução das emissões em de 75% em 02 aterros (com geração de energia) e 50% (captura dos gases) em 01, 15% nos recicláveis e 5% matéria orgânica.

A Figura 48 representa a estimativa de CO₂e de 2006 a 2030, incluindo-se na projeção os lixões, aterros controlados e sanitários.

Verifica -se que a contribuição das emissões dos lixões e aterros controlados decresce ao longo dos anos, em função das ações propostas, no entanto, é significativa na primeira década, porém no período projetado, as emissões nesses locais praticamente zeram, sendo constituída de uma baixa emissão de geração de biogás, remanescente do lixão de Camaragibe, portanto, a quase totalidade das emissões decorrem dos aterros sanitários.

Figura 48 - Estimativa da emissão de CO₂e lixões, aterros controlados e sanitários- Cenário C1

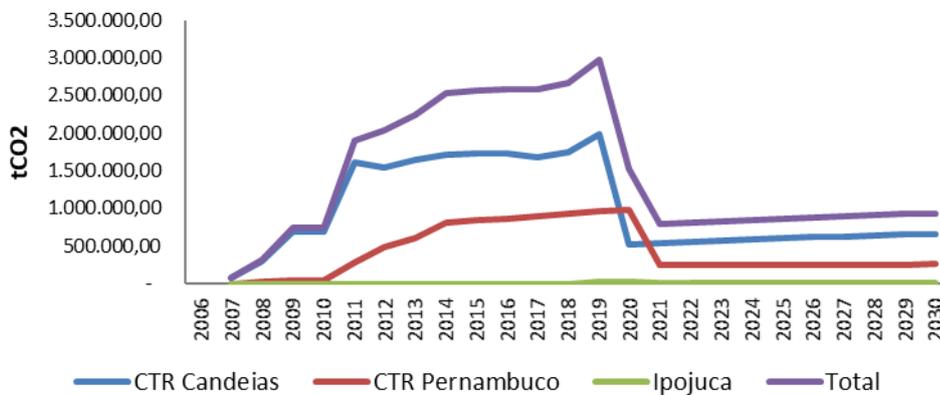


Fonte: Autora (2020)

A Figura 49 representa a estimativa de CO₂e de 2006 a 2030, admitindo-se que as emissões para o período projetado sejam decorrentes praticamente dos aterros sanitários, na qual observa-se que ocorre uma redução acentuada em relação ao cenário base (2006 a 2018).

O decréscimo obtido foi de 68.115.963,84 para 35.560.075,36 tCO₂e, o que representaria, aproximadamente, 33 milhões de toneladas de CO₂e evitadas no período. Salienta-se o fato de que, nesse Cenário 1, admitiu-se a redução de emissões pela recuperação energética do gás metano a partir de 2019.

Figura 49 - Estimativa da emissão de CO₂e aterros sanitários - Cenário C1



Fonte: Autora (2020)

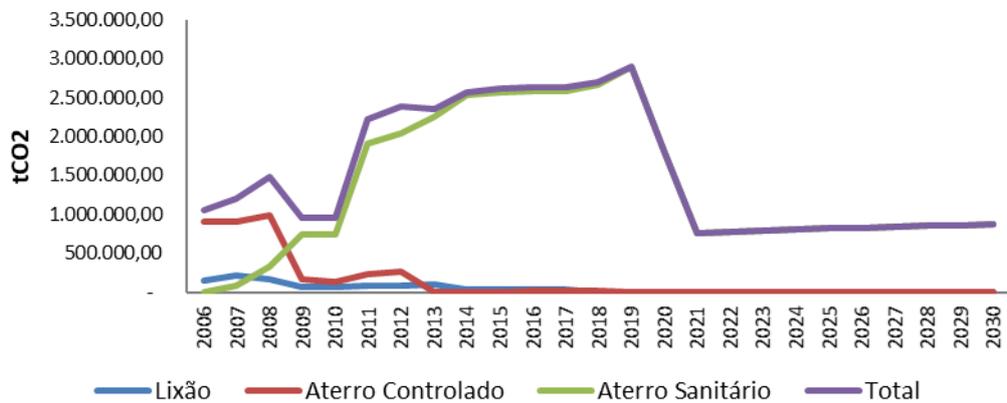
4.3.4.3 Estimativas das Emissões - Cenário 2

O **Cenário 2** difere do cenário 1, por admitir que todos os 03 aterros, fazem a captura de gás e que haveria um incremento na coleta seletiva, com desvio de recicláveis e orgânicos dos aterros sanitários.

Neste Cenário 2 ocorre uma redução moderada das emissões em relação ao Cenário 1, com um decréscimo de 35.560.075,36 para 34.990.719,10 tCO_{2e}.

Na Figura 50 representa-se a geração de CO_{2e} de 2006 a 2030, do cenário 2, considerando-se lixões, aterros controlados e sanitários.

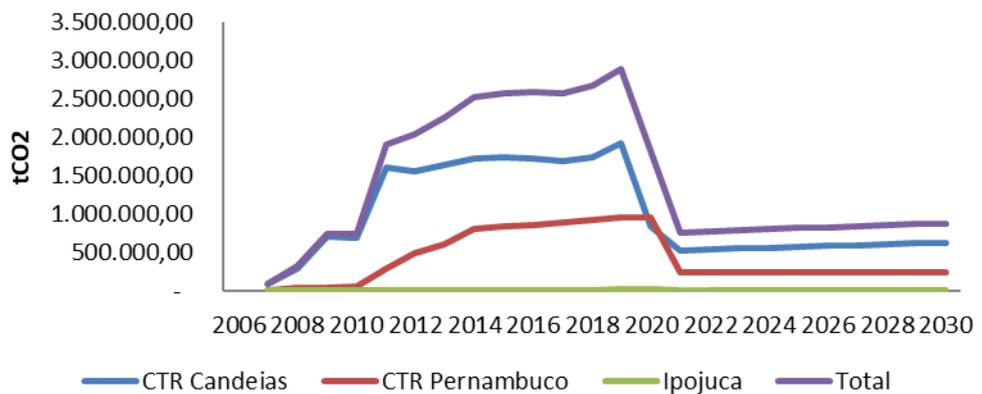
Figura 50 - Estimativa de CO_{2e} Lixões, aterros controlados e sanitários - Cenário 2



Fonte: Autora (2020)

A Figura 51 demonstra o comportamento similar dos cenários 2 e 1, considerando os aterros sanitários.

Figura 51 - Estimativa de CO_{2e} aterros sanitários - Cenário 2



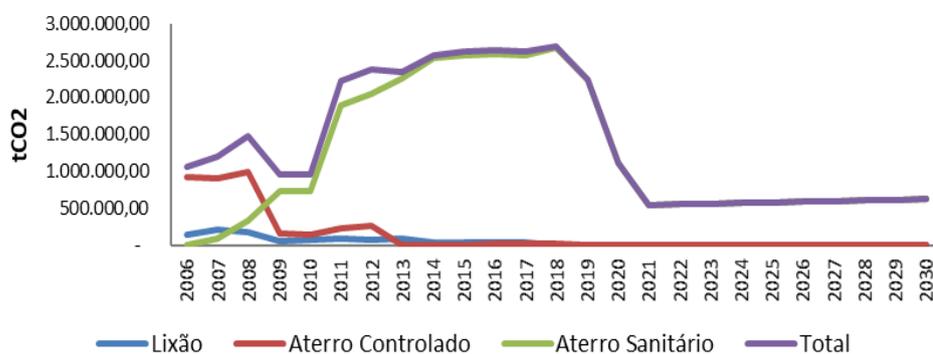
Fonte: Autora (2020)

4.3.4.4 Estimativas das Emissões - Cenário 3

No **Cenário 3**, além das políticas adotadas nos cenários anteriores, este cenário admite que haverá redução de 50% da matéria orgânica nos aterros sanitários, como previsto na PNRS, podendo ser utilizada na biodigestão.

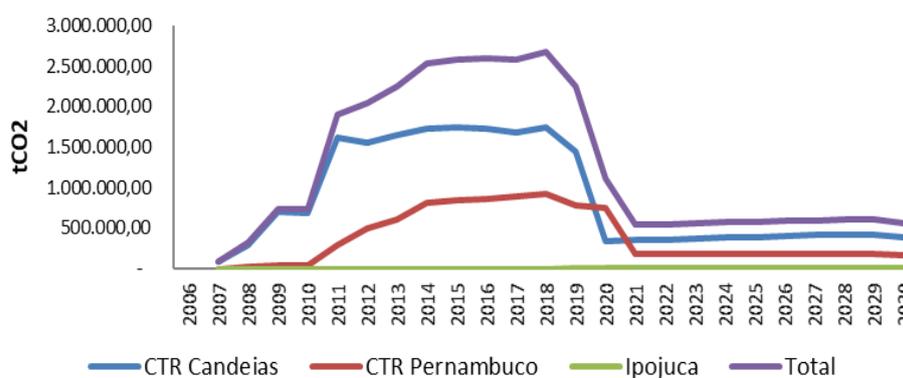
As Figuras 52 e 53, a seguir, representam as emissões de CO₂e de 2006 a 2030, do Cenário 3, considerando-se a geração de biogás pelos lixões, aterros controlados e sanitários (Figura 52) e apenas dos Aterros sanitários (Figura 53) ao longo do período. Em ambos gráficos fica evidenciado um comportamento de redução de emissões similar aos cenários anteriores.

Figura 52 - Estimativa de CO₂e. Lixões, Aterro controlado e sanitários - C3



Fonte: Autora (2020)

Figura 53 - Estimativa de CO₂e Aterros sanitários - Cenário 3



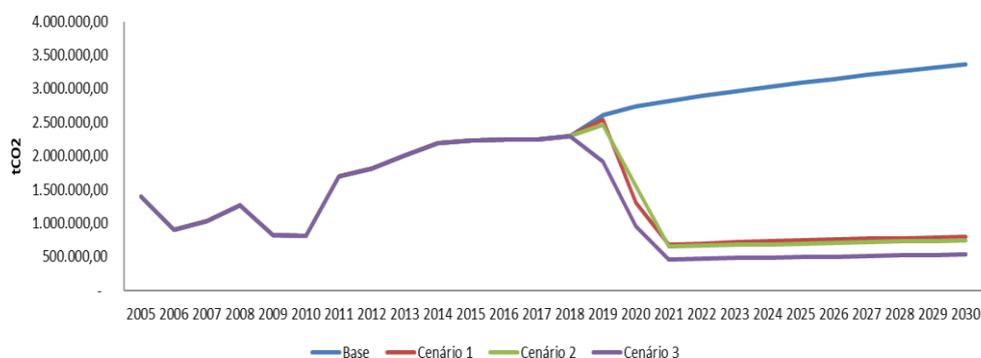
Fonte: Autora (2020)

Quantitativamente, houve um decréscimo de 34.990.719,10 para 32.236.031,57 tCO₂e, entre os cenários 2 e 3.

4.3.5 Análise comparativa das emissões dos cenários

O comportamento das emissões em função dos cenários adotados está demonstrado na Figura 54.

Figura 54 - Projeção das emissões em função dos cenários



Fonte: Autora (2020)

Na Tabela 34 encontram-se os valores estimados para os cenários, em 2025 e 2030, anos de referência das metas de redução assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris.

Tabela 34 – Valores estimados para os cenários (2025 e 2030) (tCO₂e/ano)

Ano	C base	C1	%	C2	%	C3	%
2025	3.631.943,25	867.835,45	76,11	817.733,51	77,48	580.357,94	84,02
2030	3.948.929,27	937.382,85	76,26	875.502,29	77,82	621.191,75	84,27

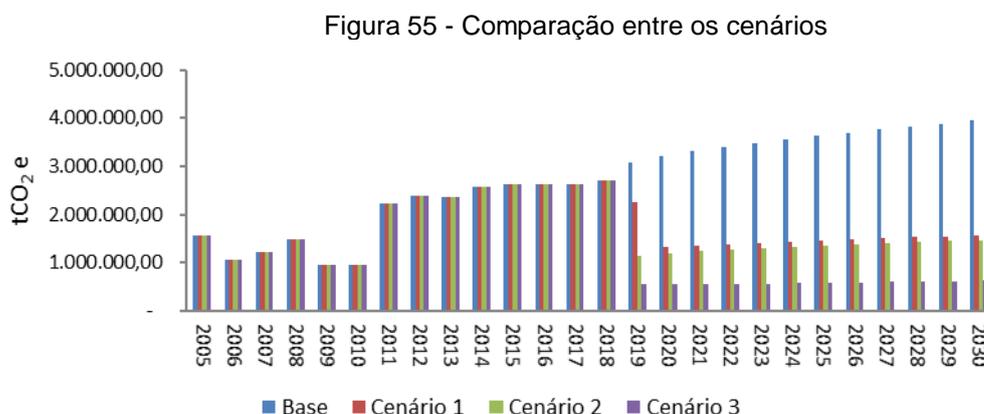
Fonte: Autora (2020)

Em uma análise comparativa dos valores estimados entre os diversos cenários adotados, para os anos 2025 e 2030, verifica-se que, em relação ao Cenário base, o Cenário 1 reduziu 76,11 % das emissões em termos absoluto, e a redução entre os Cenários 1 e 2 foi de aproximadamente 1,6%, em 2025 e 3030, e do Cenário 3 %, em 2025, e 7,8%, em 2030.

Observa-se, ainda, na Tabela 34, uma redução total em relação ao Cenário base, de aproximadamente 84%, evitando a emissão de 3.327.739 tCO₂e no ano de 2030, pela RMR.

Na Figura 55, verifica-se a redução das emissões de Dióxido de carbono dos 03 cenários em relação ao cenário base.

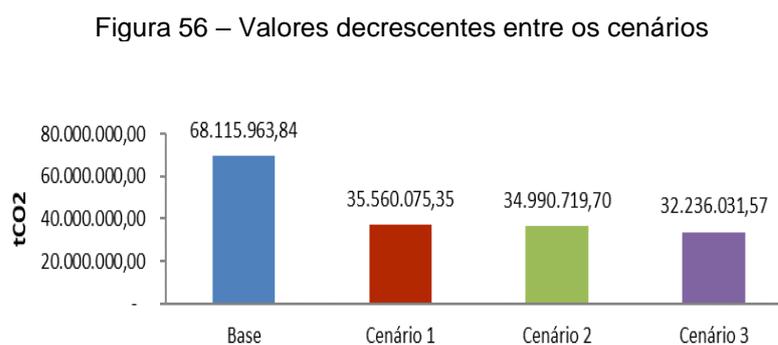
Na qual pode ser observado que há uma tendência de crescimento das emissões caso não ocorra nenhuma intervenção, e em se mantendo as condições de gestão dos resíduos sólidos na RMR, a partir de 2019. No entanto, em se consolidando os cenários provavelmente haverá redução nas emissões.



Fonte: Autora (2020)

Em função das projeções realizadas observa-se que seriam emitidas aproximadamente 68 milhões de tCO₂e decorrente do Cenário base, 35 milhões de tCO₂e em cada um dos Cenários 1 e 2. E de 32 milhões de tCO₂e no Cenário 3. Em termos de emissões evitadas, no período de 2005 a 2030, isso representa cerca de 36 milhões de tCO₂e a menos pela disposição de resíduos sólidos na RMR.

A Figura 56 estão apresentados os valores decrescente entre os cenários C1, C2 e C3.



Fonte: Autora (2020)

4.3.6 Análise comparativa dos cenários com a NDC

O cálculo dos limites admissíveis para as emissões, em função das reduções assumidas pelo país em 2015, para os anos de 2025 (37%) e 2030 (43%), em relação ao valor obtido em 2005, permitiu a análise comparativa dos resultados dos cenários com a NDC Brasileira (Tabela 35).

Tabela 35 - Comparação entre valores absolutos admissíveis (2005) e emissões na RMR

1º inventário brasileiro/recorte RMR (2005)			tCO ₂ e	
Ano	C1	C2	C3	Admissível NDC
2025	867.835,47	817.733,52	580.357,94	982.336,32
%	11,66	16,76	40,92	
2030	937.382,85	875.502,29	621.191,75	888,780,48
%	-5,47	1,49	30,11%	

Fonte: Autora (2020)

Os valores obtidos apontam para o atendimento da NDC Brasileira, exceto para o cenário 1, em 2030, que apresenta 5,47% de emissões acima do valor admitido para aquele ano, porém para os demais a meta é atingida já a partir do Cenário 2 (Tabela 35).

Nesta pesquisa, ficou constatado que se as políticas públicas e investimentos previstos nos cenários de mitigação forem efetivados, a RMR atende a NDC Brasileira tanto em 2025 como em 2030.

No entanto, se faz necessário que os municípios envidem esforços para implementar um programa de coleta seletiva para que as metas de redução de matérias recicláveis e orgânicos sejam atingidas, assim como deve ser mantido o controle por parte dos órgãos regulatórios com relação ao funcionamento as centrais de tratamento. Adiconamente deve haver um campanha de educação para o engajamento da população nas ações de redução na fonte a geração de resíduos e de melhoria e incremento da coleta setiva.

5 CONCLUSÃO

O presente tópico apresenta as principais conclusões da pesquisa, quais sejam:

A utilização do modelo do IPCC propiciou a elaboração do inventários de gases de efeito estufa, com a estimativa de emissões anuais e acumulativa, assim como a determinação do atendimento da NDC Brasileira.

Houve aprimoramento nos resultados obtidos, tornando-os mais próximos das condições do local, uma vez que foram utilizados os parâmetros otimizados com dados calibrados e monitorados em experimento em aterro localizado na RMR, contornando erros associados às estimativas de emissões.

A realização dos estudos para enquadramento dos municípios da RMR, nas faixas populacionais e definição da geração *per capita* em cada um deles, a partir dos dados de 2006 a 2017, do Sistema Nacional de Informação de Saneamento foi uma ferramenta que contribuiu para a melhoria dos dados projetados nos cenários admitidos.

O método utilizado e a definição de cenários com alternativas de mitigação das emissões permitiu identificar em termos de atendimento a NDC, que seriam evitadas aproximadamente 36 milhões de tCO₂e de emissões, pela disposição de RSU na RMR, equivalente a 52% de redução no período de 2005 a 2030, superior aos 47% assumidos pelo país no Acordo de Paris, em 2015.

Isto fez com que, em relação ao atendimento da NDC, considerando os valores absolutos de 2005, a RMR venha a atender a NDC Brasileira nos cenários de mitigação adotados.

As metas da NDC serão alcançadas, desde que as políticas públicas referentes à gestão de resíduos sólidos, definidas nos cenários adotados, sejam implementadas, integradas e monitoradas.

As contribuições deste trabalho, tais como: melhoria na gestão dos resíduos sólidos, informações e dados registrados, a elaboração do inventário de GEE, assim como do plano metropolitano e as ações constantes nos cenários, constituem subsídios para formulação de políticas públicas em parceria com os municípios da RMR e com o setor privado.

Estas contribuições possibilitam, além do cumprimento das metas do NDC, o atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio nas mudanças climáticas, no setor de resíduos com o aproveitamento energético - ODS13 e nos demais, desde o 1º ODS da erradicação da pobreza, com a geração de emprego e renda na cadeia produtiva dos recicláveis, ao ODS17, com valorização econômica dos resíduos, e em especial ao ODS14, da proteção dos oceanos, no processo de adequação às mudanças climáticas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A questão da disposição ambientalmente adequada dos resíduos na RMR pode ser considerada equacionada, no entanto se faz necessário a disposição dos resíduos, em aterros, apenas dos rejeitos.

Fator relevante para a redução das emissões e dos impactos ambientais existentes, inclui o envolvimento da população para redução da geração dos resíduos e efetivação da coleta seletiva nos municípios da RMR. Seguido de definição de novas rotas tecnológicas como a prática da compostagem e o aproveitamento energético dos resíduos, uma vez que os aterros existentes têm final de vida útil prevista para os anos 2032 a 2035. Uma das opções é a implementação de central de tratamento no Oeste Metropolitano.

A implementação imediata das alternativas de rotas tecnológicas, da manutenção da infraestrutura e implementação das políticas apontadas nos cenários refletem nos resultados obtidos e no percentual de cumprimento das metas do NDC.

Para continuidade e maior abrangência dessa pesquisa, recomenda-se:

- a) Estudo adicional para avaliação das emissões evitadas decorrentes do tratamento mecanizado, da produção de CDR e do aproveitamento energético;
- b) Estudo para a determinação da composição gravimétrica dos resíduos, considerando a coleta seletiva, preenchendo lacunas com periodicidade e informações quantitativas e qualitativas;
- c) Estudo das emissões evitadas pelos serviços ambientais dos catadores e catadoras nas organizações, da RMR, com base na metodologia aprovada pelo IPCC, (2018) AMS-III.BA. Recovery and recycling of materials from E-waste;
- d) Estudo para quantificar a produção de resíduos em cada associação e cooperativa para se estabelecer alternativas econômicas e logísticas, visando verificar qual é de fato a produção de resíduos de cada empreendimento e construir cenários de indicação econômica;
- e) Estudo para avaliação das ações nacionalmente e internacionalmente para atendimento das NDCs, visto que, em 2027, os países deverão apresentar os seus relatórios de atendimento às NDCs nacionais.

Estando em andamento várias ações, internacionalmente e nacionalmente, com esse objetivo, tais como:

- a) A China, como o maior emissor internacional de gases de efeito estufa, está em primeiro lugar nos projetos de MDL, e tem investido em tecnologia em Waste to Energy;
- b) Os países da União Europeia, atendendo às diretivas para a gestão de resíduos sólidos e mudança do clima, investem forte na educação ambiental para a redução da geração, e na coleta seletiva para a valorização dos materiais recicláveis, numa transição de uma economia linear para circular;
- c) No Brasil, os estados e municípios têm elaborado políticas para enfrentamento das mudanças do clima, inventários das emissões e definido metas de redução para mitigação e adaptação.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. 2017. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2017.pdf>> Acesso em: 02.10.2017.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010**. 2010. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2010.pdf>> Acesso em: 28.03.2015.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**. 2016. Disponível em: < http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama_2016.pdf> Acesso em: 17.07.2016.

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. 2019. Disponível em: < <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2019.pdf>> Acesso em: 12.12.2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 10004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 884**: Apresentação de projetos de aterros controlado de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro. 1989.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 10.703**. Degradação do solo. São Paulo, 1989.

ALHEIROS, M. M. 149 f. **Riscos de escorregamentos na Região Metropolitana do Recife**. Tese (Doutorado em Ciências Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador 1998.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**, São Paulo, 2000.

ATEPE/GRS/UPFE, GIZ. **Caderno 2**: gestão de resíduos sólidos urbanos com baixas emissões de carbono. Brasília, 2018.

ALGOSOBRE. **Metropolização e problemas sociais urbanos**. 2018. Disponível em: <https://www.algosobre.com.br/geografia/metropolizacao-e-problemas-sociais-urbanos.html>, acesso em 09.02.2018.

BANCO MUNDIAL. **Estudo de baixo carbono para o Brasil: relatório síntese técnico de resíduos sólidos**. EUA, 2010.

BIDONE, F. R. A.; PAVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. Publicação EESC – USP São Carlos, SP, 1999.

BITOUN, J.; MIRANDA, L.; SOUZA, M. A. A.; LYRA, M. R. S. BRITTO. **Região Metropolitana do Recife no Contexto de Pernambuco no Censo 2010. Observatório das Metrôpoles**, 2010. Disponível em:

<http://www.observatoriodasmetropoles.net/download/Texto_BOLETIM_RECIFE_FINAL.pdf>. Acesso em: 04/12/2016.

BRASIL, Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA e institui o Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 31 de agosto. 1981.

_____. Acordo de Paris. Disponível em <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris> acesso 02.01.2018

_____. Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 02 de agosto de 2010.

_____. Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Estatuto das Cidades. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 10 de julho de 2001.

_____. Lei Federal nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015. Estatuto da Metrópole. Institui o Estatuto da Metrópole, altera a Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 12 de janeiro de 2015.

_____. Lei Federal Nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão na prestação de serviços públicos previstos no art. 175 da Constituição Federal, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 de fev. 1995.

_____. Lei Federal Nº 11.107, de 6 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 de abr. 2005.

_____. Lei Federal Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 de jan. 2007.

_____. Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 – Ministério do Meio Ambiente. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de

12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2 de ago. 2010.

_____. Decreto Federal N° 7.217, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei n° 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 de jun. 2010.

_____. Ministério das Cidades. **Política e plano municipal de saneamento ambiental: experiências e recomendações. Brasília, 2005**. Disponível em: <http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/coea/pncpr/Politica_Municipal_Saneamento.pdf>. Acesso em: 19/08/2016.

_____. Ministério das Cidades. **Elementos para a Organização da Coleta Seletiva e Projeto dos Galpões de Triagem**. Brasília, 2008 Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/ManualColetaSeletiva.pdf>. Acesso em: 20/08/2016

_____. Ministério de meio Ambiente. **Mudanças climáticas**. Karen de Oliveira Silverwood. Brasília, 2011.

_____. Ministério de Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2011.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Segundo inventário de gases de efeito estufa**, 2010. Disponível www.mcti.gov.br. Acesso em 06.01.2018.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativa anuais de gases de efeito estufa**, 2014. Disponível em <sirene.mcti.gov.br/publicações>. Acesso em 06.01.2018.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Terceiro inventário de gases de efeito estufa**, 2016. Disponível <sirene.mcti.gov.br/publicações>. Acesso em 06.01.2018.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Trajetórias de mitigação e instrumentos de políticas públicas para alcance das metas brasileiras no acordo de Paris**, 2017. Disponível em: <sirene.mcti.gov.br/publicações>. Acesso em 11.01.2018

CAMPOS, P. P. S. **Gestão integrada de políticas públicas relacionadas às mudanças climáticas na Região Metropolitana de São Paulo**. 2014. 531 f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

CEMPRE / IPT. Compromisso Empresarial para Reciclagem / Instituto de Pesquisa Tecnológica. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2ª Edição. São Paulo, 2000.

CEMPRE / IPT. Compromisso Empresarial para Reciclagem / Instituto de Pesquisa Tecnológica. **Radiografando a Coleta Seletiva**. CEMPRE Cicsoft, 2012. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/ciclossoft_2012.php>. Acesso em: 20/08/2015.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Nota técnica IV – geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos e rurais, 2001**. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/Nota%20t%E9cnica%20VII%20-%20biog%E1s.pdf>>. Acesso em: 13/08/2017.

CIRCLE ECONOMY. **The circularity gap report**. 2019. https://docs.wixstatic.com/ugd/ad6e59_ba1e4d16c64f44fa94fbd8708eae8e34.pdf. Acesso em 24.03. 2019.

COSTA, M. B.S. F.; MALLMANN, D. L. B.; PONTES, P.M.; ARAUJO, M. Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the metropolitan Center of Recife, Northeast Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 341-349. 2010.

CNMAD. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento**. Rio/ Brasil. 1992.

CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informações geoambientais da Região Metropolitana de Recife**. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia. Superintendência Regional de Recife, 2003.

DIAS, D.M.N.; MARTINEZ C.B.; BARROS R.T.V.B.; LIBÂNIO, M. Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais. **Revista de Engenharia. Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n.3 2012.

ECF. Climate Change: **Implications for cities**. European Climate Foundation (ECF) 2014. Disponível em: <http://www.iclei.org/fileadmin/PUBLICATIONS/Brochures/IPCC_AR5_Cities_Summary_FINAL_Web.pdf>. Acesso em: outubro/2018.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA solos, 306p.2006.

EUROSTAT. Climate change and energy, 2017. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/sdi/indicators/climate-change-and-energy> .acesso em: 14 de setembro de 2018.

FIDEM - Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife. **Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana do Recife**. Projeto SINGRE – Série Recursos Hídricos Vol. 2. Recife, 1994.

FELIPETTO, A. V. M. **Mecanismos de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: conceito, planejamento e oportunidades.** Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás.** 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

FIRMO, A.L.B; RODRIGUES, T.S.N. **Inventário de emissões de metano pelo manejo de resíduos sólidos urbanos no Estado de Pernambuco no período de 1990 a 2005.** Relatório técnico. UFPE/GRS. Recife, 2009.

FIRMO, A.L.B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos.** 2013. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

FIRMO, A.L.B; GUIMARÃES, L. J. N.; MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. **Estimate of methane generation in experimental landfill located at Muribeca Landfill / Brasil - using simple methods.** Fourth International workshop hydro-physic-mechanics of landfill. Santander, Spain. 2011.

FIRMO, A.L.B. **Diagnóstico de emissões de metano pelo manejo de resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana do Recife/PE.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Recife. 2009.

FRICKE, K.; PEREIRA, C.; LEITE, A.; BAGNAT, A. (Coord.) **Gestão Sustentável de resíduos sólidos urbano: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil.** Technische University Braunschweig. 2015.

GAMA, A. C. F.; **Avaliação da agenda 21 da bacia hidrográfica do rio Pirapama. Recife: UFPE.** 2003. 172 f. Dissertação (Mestrado de Gestão e Políticas Ambientais) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2003.

GIZ, **Sectorial implementation of nationally determined contribution (NDCs): circular economy and solid waste management.** Briefings series. BONN , october 2017.

GIZ (a), **Alternativas em waste-to-energy na gestão de resíduos sólidos.** : um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento. Eschborn, 2017.

GIZ, Caderno de gestão de resíduos sólidos urbanos. Plansab. Brasília. 2019.

IBAMA. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente. Instrução Normativa Nº 13/2012. Brasília. 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geográfico a Estatística. **Cidades**. Rio de Janeiro, 2010 Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?coduf=26>>. Acesso em: 20 maio. 2015.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Mercado de trabalho - economia solidária e políticas públicas**. A crise financeira e os catadores de materiais recicláveis. Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis. Brasília, 2009.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2019: Summary for Policymakers. In: **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. IPCC, Monaco, 1170, 2019.

IPCC. **Regional Impacts from change in the ocean and cryosphere**. Principado de Mônaco, 2019.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/09/SROCC_SPM2_Final_2481x.jpg. Acessado em 03.10.2019.

IPCC, **Summary for policymakers of IPCC special report on global warming of 1.5°C approved by governments**, October 8, 2016.

IPCC. **IPCC Special report on global warming of 1.5°C**, .2018.

IPCC. **Summary for policymakers: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2001. Disponível em: Acesso em 23 de jul. de 2017.

IPCC. **Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2014.

IPCC. **Good practice guidance and uncertainty management in national regenhouse gas inventories**. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Enmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K. and Tanabe K. (Eds), **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan, 2000.

IPCC. Emission scenarios: a special report of working group III. 2000. ENGLAND. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/> Acesso em 05.02.2020

IPCC. **Guidiline for national greenhouse gas inventories**, 2006. Disponível em http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf. Acesso em 03.02.2018.

JUCÁ, J. F. T.; Lima, J. D.; MARIANO, M. O. H.; FIRMO, A. L. B.; LIMA, D. G. A.; LUCENA, L. F. L.; CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; CAVALCANTI, R. M. S.; SÁ, E. V. F. L.; MELO, R.; MENDONÇA, M. Z.; GALVÃO, D. **Análise das Diversas Tecnologias**

e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Recife: BNDS, FADE, UFPE, GRS. 2013.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro de resíduos sólidos experimental.** 2009. 333 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco), Recife, 2009.

MALINA, G. **An overview of developments of bio-waste treatment towards biogas generation in Poland.** In: Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, 2003.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos.** 2013. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

MATA, O. J. **Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Betim-MG.** 2012. 37 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de produção na agropecuária) - Universidade José do Rosário Vellano, Alfenas, 2012.

MERSONI, C. **Avaliação do ciclo de vida como técnica de apoio à decisão no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Garibaldi/RS.** 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Universidade de Caxias do Sul. 2015.

MOREIRA, A. C. **Avaliação da gestão integrada de resíduos sólidos urbanos em municípios da região metropolitana de Belo Horizonte.** 2012. 381 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2012.

NICOLLI, F.; MAZZANTI, M.; IAFOLLA, V. Waste Dynamics, Country Heterogeneity and European Environmental Policy Effectiveness. **Journal of Environmental Policy & Planning**, v.14, n. 4, p. 371-393, 2012.

OONK., H.; WEENK, A.; COOPS, O.; LUNING, L. **Validation of landfill gas formation models.** Dutch organization for Applied Scientific Research, Report n. 94-315. Apeldoorn, Netherlands. 1994.

OGOR, Y.; GUERBOIS, M. **Comparison of landfill methane emission models: a case study. Proceeding Sardinia.** Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, October 2005.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012)** [recurso eletrônico]: setor de resíduos / Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (Imaflora) e ICLEI-Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI). – São 2014.

OBSERVATÓRIO DAS METROPOLES, **Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia**. Pernambuco, 2010. Disponível em:<
<http://www.observatoriodasmetropoles.net/>>. Acesso em: 01 jun. 2015.

OLIVEIRA, L.R.G.; SANTOS FILHO, D.L.A.; VASCONCELOS, K.C.; LUCENA, T.V.; JUCÁ, J.F.T.; SANTOS, A.F.M.S. Methanization potential of anaerobic digestion of solid food waste, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande/PB. v22. N.1, p.69-73, 2018.

PAZ, F.; FIRMO A.L.B. Inventory of methane emission from municipal solid waste management in Pernambuco State, Brasil. **EJGE**. Vol. 20 (2015).

PAZ, H.F.; FIRMO, A.L.B. Estimativa da geração de metano proveniente dos locais de disposição final de RSU em Pernambuco segundo as diretrizes do plano estadual de resíduos sólidos. **Revista DAE**, N 211. Vol. 66. São Paulo. 2018. DOI: 10.4322/dae.2018.010.

PBMC. **Mudanças climáticas e cidades**: relatório especial do painel brasileiro de mudanças climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. 2016.

PERNAMBUCO. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Plano metropolitano de resíduos sólidos - PMRS: Região Metropolitana do Recife - RMR**. Recife: SECID, 2011.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da RMR**. Recife: Caruso Jr., 2013.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Projeto de remediação de áreas degradadas dos lixões**: Abreu e Lima, Araçoiaba, Ilha de Itamaracá, Igarassu, Itapissuma - PE. Recife: Caruso Jr., 2013.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Projeto de remediação e encerramento de lixões**: Camaragibe, Moreno e São Lourenço da Mata - PE. Recife: Engeconsult., 2013.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Sistema metropolitano de resíduos sólidos da RMR**: Estudo de concepção de concepção coleta seletiva e tratamento de resíduos sólidos da RMR. Recife: Caruso Jr., 2014.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Anteprojeto do aterro sanitário de São Lourenço da Mata**. Recife: Engeconsult, 2014.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Estudo da gestão consorciada** – EGC: RMR. Recife: Caruso jr., 2018.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Plano de resíduos sólidos da RDM-PE** – PRS/PE. Recife: Caruso jr., 2018.

_____. Secretaria das Cidades do Estado de Pernambuco. **Programa de coleta seletiva da RDM/PE** – PCS. Recife: Caruso jr., 2018.

PERNAMBUCO. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado de Pernambuco. **Plano estadual de resíduos sólidos**. Recife: SEMAS, 2012.

_____. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado de Pernambuco. **Política de enfrentamento das mudanças climáticas**, SEMAS. Recife, 2009.

_____. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado de Pernambuco. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do Estado de Pernambuco - 2015 a 2018**, SEMAS. Recife, 2019.

PERNAMBUCO (a). Secretaria de Trabalho, Qualificação e Empreendedorismo do Estado de Pernambuco. **Diagnóstico situacional no âmbito do projeto desenvolvimento dos catadores e catadoras de Pernambuco** – Projeto Rescate. Relatório final, STQE. Recife, 2018.

PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. **Primeiro inventário de emissões de gases de efeito estufa da Cidade do Recife**. Recife: PCR/ICLEI. 2015.

_____. **Plano de redução de emissões de gases de efeito estufa da Cidade do Recife**. Recife: PCR/ICLEI. 2016.

_____. **Projeto pegada de Cidades. Inventário de emissões Recife, 2012 - 2015**. Recife: PCR/CAF. 2017.

REICHERT, G. A. **Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação de ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre**. 2013. 210 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e

Saneamento Ambiental.) – Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013.

ROSENZWEIG, C. et al. **Urban climate change in context. climate change and cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network**, C. Rosenzweig, W. D. Solecki, S. A. Hammer, S. Mehrotra, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 3–11. 2011.

ROBINSON, A.; SEWELL, G.; DAMODARAN, N.; DAVID, E.; KALAS-ADAMS, N. **Landfills in developing countries and global warming**. In: Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italian, 2003.

SANTOS, L.A.; VALENÇA.B.R.; SILVA,L.C.S.; HOLANDA, S.H.B.;SILVA, A.F.V.; JUCÁ, J.F.T.;SANTOS,A.F.M.S. Methane generation potential trough anaerobic digestion of fruit waste, **Journal of Cleaner Production**. ELSEVIER LTDA. 256(2020) 120389, 2020.

SÁ, E.V.F.L; JUCÁ,J.F.T; MOTTA SOBRINHO, M.A. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destiladores solar. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté,v.7, n1, p.204 a 207, 2012.

SEEG. **Estimativas de emissões de gases de efeito estufa do Brasil 1970- 2016**. São Paulo, 2017.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas Implicações para as metas do Brasil 1970- 2018**. São Paulo, 2019.

UNEP. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1,5C**. 2018. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>. Acesso em: 25/11/2018.

UNITED NATIONS - UN .**Sustainable development goals**. 2015.Disponível em: [//www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals](http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals). Acesso em 06.01.2018.

SÃO PAULO, Secretaria de Meio Ambiente. **Caderno de educação ambiental**. São Paulo: SMA, 2013.

SERRANO, P. E. A. P. **Região metropolitana e seu regime constitucional**. São Paulo, 2009.

SOMEKH, N. **Regiões metropolitanas no Brasil: desenvolvimento e território: Seminário nacional governança urbana e desenvolvimento metropolitano.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2010.

TAVARES. G.S.C. **Contribuição para a sustentabilidade na gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios da Região Metropolitana.** 2018. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

TUDOR, T.; ROBINSON, G. M.; RILEY, M.; GUILBERT, S.; BARR, S. W. Challenges facing the sustainable consumption and waste management agendas: perspectives on UK households, *Local Environment: The International Journal of Justice and Sustainability*, v. 16, n. 1, p. 51-66, 2011.

TCE/PE. **Diagnóstico de Resíduos Sólidos. 2017.** Disponível em <http://www.tce.pe.gov.br/internet/index.php/estudos-e-levantamentos-novo>. Acesso em 10.11.2017.

TCE/PE. **Diagnóstico de Resíduos Sólidos. 2018.** Disponível em <http://www.tce.pe.gov.br/internet/index.php/estudos-e-levantamentos-novo>. Acesso em 10.05.2019.

TERRA. **Século das Cidades**, 2018. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/o-seculo-das-cidades,65756344819cce17fba184ded7211143jv53vz0c.html> .Acesso em 09.02.2018.

TODA MATERIA. **Desastres naturais**, 2018. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/desastres-naturais/> acesso em 09.02.2018

TODA MATERIA. **Urbanização brasileira.** Disponível em <https://www.todamateria.com.br/urbanizacao-brasileira/>. acesso em 09.02.2018.

UFPE. Universidade Federal de Pernambuco. Grupo de Resíduos Sólidos. Projeto do Aterro Sanitário de Muribeca. Recife. 2008.

UFPE. Universidade Federal de Pernambuco. Grupo de Resíduos Sólidos. Projeto do Aterro Controlado /Remediação de Aguazinha. Recife. 2010.

UNEP. **Near-term climate protection and clean air benefits:** Actions for controlling short-lived climate forcers. Kenya: UNEP.2011.

UNEP and ISWA. **Global Waste Management Outlook**. Disponível em: https://www.unep.org/ietc/sites/unep.org.ietc/files/GWMO_summary_0.pdf. Acesso em 14/09/2018. 2015.

UNFCCC. **United nations framework convention on climate change projects DML**. 2015. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch>.

UNFCCC. **CDM Methodologies**. 2016 Disponível em: [http://cdm.unfccc.int/methodologies/PA methodologies/tools/am-tool-02-v2.2](http://cdm.unfccc.int/methodologies/PA%20methodologies/tools/am-tool-02-v2.2). Acesso em 29.04.2019. <https://cdm.unfccc.int/PRCContainer/DB/prcp262247318/view>.

USEPA. **Turning a liability into an asset: A landfill gas-to-energy project development handbook**. Landfill Methane Outreach Program (LMOP), EPA 430-B-96-0004.1996. <https://nacoesunidas.org/acordodeparis/> Acesso em: 02.01.2018.

APÊNDICE A - ESPELHO DE PLANILHAS

Cálculo de geração de gás metano: Sanitários

	Otimizado
DOC degradável	DOC 0,320
DOCf	DOCf 0,789
Constante da taxa de geração de gás metano	$k = \ln(2)/t_{1/2}$ 0,200
Tempo de meia-vida	h 2,000
Fração de gás metano	F 0,500

ABREU E LIMA							
Ano	Quantidade Depositada (V) Ton	MCF (MCF) Fração	DOC Degradável Depositada (V*DOC*MCF) Ton	DDOCm liberada para ser	DDOCm degradada E Ton	DDOCm Acumulada Ton	Gás Metano Gerado $Q = E * 16/12 * F$ Ton
2006	2.893,98	0,40	272,07	272,07	49,32	222,75	32,88
2007	3.386,18	0,40	341,98	564,73	102,37	462,36	68,25
2008	2.790,89	0,40	281,86	744,22	134,90	609,32	89,94
2009	3.022,11	0,40	305,21	914,52	165,78	748,75	110,52
2010	3.214,14	0,40	324,60	1.073,35	194,57	878,79	129,71
2011	5.728,47	0,40	578,53	1.457,32	264,17	1.193,15	176,11
2012	5.999,50	0,40	605,90	1.799,05	326,11	1.472,94	217,41
2013	6.500,17	1,00	1.641,16	3.114,10	564,49	2.549,61	376,33
2014	6.772,11	1,00	1.709,82	4.259,43	772,10	3.487,33	514,74
2015	6.281,31	1,00	1.585,90	5.073,23	919,62	4.153,61	613,08
2016	5.343,66	1,00	1.349,17	5.502,78	997,48	4.505,29	664,99
2017	4.924,69	1,00	1.243,39	5.748,68	1.042,06	4.706,62	694,71
2018	4.081,54	1,00	1.030,51	5.737,13	1.039,97	4.697,16	693,31
2019	2.375,28	1,00	599,71	5.296,87	960,16	4.336,71	640,11
2020	2.390,48	1,00	603,55	4.940,26	895,52	4.044,74	597,01
2021	2.405,78	1,00	607,41	4.652,15	843,29	3.808,86	562,19
2022	2.421,17	1,00	611,30	4.420,16	801,24	3.618,92	534,16
2023	2.436,67	1,00	615,21	4.234,13	767,52	3.466,61	511,68
2024	2.452,26	1,00	619,15	4.085,76	740,62	3.345,14	493,75
2025	2.467,96	1,00	623,11	3.968,25	719,32	3.248,93	479,55
2026	2.483,75	1,00	627,10	3.876,02	702,60	3.173,42	468,40
2027	2.499,65	1,00	631,11	3.804,53	689,64	3.114,89	459,76
2028	2.515,65	1,00	635,15	3.750,04	679,77	3.070,27	453,18
2029	2.531,75	1,00	639,22	3.709,49	672,42	3.037,07	448,28
2030	2.547,95	1,00	643,31	3.680,38	667,14	3.013,24	444,76

Quantidade de Resíduos dispostos por município															
Ano	Abreu e Lima	Araçoiaba	Cabo de Santo Agostinho	Camaragibe	Goiana	Igarassu	Ipojuca	Itamaracá	Itapissuma	Jaboatão dos Guararapes	Moreno	Olinda	Paulista	Recife	São Lourenço da Mata
2006	22.393,04	4.255,92	51.460,43	46.299,61	-	23.228,73	13.594,34	4.600,89	5.296,97	181.007,26	12.192,20	62.459,14	159.292,87	511.774,91	25.815,90
2007	28.147,81	4.693,96	50.350,88	44.806,93	-	28.520,82	17.796,63	5.074,04	5.746,54	17.168,09	11.968,28	83.334,55	166.529,45	483.835,88	38.157,26
2008	23.199,45	4.009,19	52.016,85	40.695,94	-	24.604,72	15.063,25	4.397,69	4.899,42	100.836,98	12.998,71	90.227,93	174.030,00	493.651,29	19.931,41
2009	24.090,59	4.421,00	50.206,29	42.215,92	-	25.823,80	16.110,99	4.884,82	5.393,48	111.765,13	2.835,49	91.461,93	22.969,56	79,64	28.406,78
2010	25.610,68	4.438,26	49.524,99	47.457,08	-	27.770,70	17.655,92	4.961,96	5.349,44	120.139,62	7.141,35	58.108,53	65.856,23	60.925,31	30.420,91
2011	45.645,14	4.693,69	52.529,53	46.861,86	-	35.224,91	19.130,08	5.192,61	5.555,55	139.643,27	8.179,89	145.512,82	82.716,91	629.131,50	32.778,76
2012	47.804,80	4.755,86	55.195,78	48.290,21	-	33.466,90	19.749,25	4.960,59	5.697,93	146.963,54	8.203,39	141.016,41	89.703,14	545.485,64	33.648,62
2013	51.794,15	2.297,34	67.548,68	48.880,56	-	34.113,46	36.329,62	9.332,33	5.911,84	153.853,89	10.330,42	137.774,66	96.493,31	534.534,89	31.791,68
2014	53.961,02	4.834,54	69.174,88	49.912,97	14.779,01	35.594,15	41.718,37	10.248,76	8.165,52	160.276,56	11.880,26	159.273,09	94.709,00	554.058,09	37.440,08
2015	50.050,24	5.317,92	66.188,93	49.299,26	43.705,23	34.503,88	40.642,17	11.102,36	8.013,94	157.196,86	11.410,60	126.363,81	88.998,10	535.187,11	38.399,32
2016	42.579,00	4.819,77	61.312,94	47.549,69	30.012,57	37.103,61	42.242,57	12.551,10	8.602,97	161.770,48	10.843,25	115.688,08	88.729,66	514.684,45	36.195,81
2017	39.240,57	3.905,43	49.391,81	49.715,27	36.253,59	35.982,27	40.947,24	11.669,97	9.285,79	195.776,75	8.760,42	119.903,62	90.101,23	518.504,99	37.462,16
2018	32.522,25	4.069,46	24.351,42	50.207,45	29.001,73	31.147,58	43.855,39	13.271,45	8.648,17	114.249,65	7.731,44	121.523,88	94.199,08	512.409,97	26.940,98
2019	30.807,72	5.620,91	60.374,12	50.704,50	14.725,47	34.773,08	24.071,90	6.695,56	6.609,52	230.767,84	18.699,84	130.973,12	109.169,32	638.043,92	34.240,08
2020	31.004,69	5.699,60	61.140,87	51.206,48	14.821,19	35.325,97	24.565,37	6.795,33	6.696,76	232.983,21	8.916,76	131.824,44	110.250,71	642.893,10	34.609,87
2021	31.203,32	5.779,40	61.917,36	51.713,42	14.917,53	35.887,65	25.068,96	6.938,03	6.785,16	235.219,85	19.136,19	132.681,30	111.342,19	647.785,13	34.963,66
2022	31.403,02	5.860,31	62.703,71	52.225,39	15.014,49	36.459,27	25.582,87	7.089,73	6.874,73	237.477,96	19.358,17	133.545,73	112.444,48	652.708,30	35.361,48
2023	31.604,00	5.942,35	63.500,04	52.742,42	15.112,08	37.037,95	26.107,32	7.232,49	6.965,47	239.757,75	19.592,72	134.411,76	113.557,68	657.668,88	35.743,39
2024	31.806,27	6.025,35	64.306,49	53.284,57	15.210,31	37.626,86	26.642,52	7.384,37	7.057,42	242.059,43	19.809,88	135.285,44	114.681,90	662.667,16	36.129,42
2025	32.009,83	6.109,90	65.123,19	53.791,69	15.309,18	38.225,12	27.188,69	7.539,44	7.190,57	244.383,20	20.039,68	136.164,80	115.817,25	667.703,43	36.519,62
2026	32.214,69	6.195,44	65.950,25	54.324,43	15.408,69	38.832,90	27.746,06	7.697,77	7.244,96	246.729,28	20.272,14	137.049,87	116.963,84	672.777,98	36.914,03
2027	32.420,87	6.282,18	66.787,82	54.862,24	15.508,85	39.450,35	28.314,86	7.859,42	7.340,59	249.097,88	20.507,30	137.940,63	118.121,78	677.891,09	37.312,70
2028	32.628,36	6.370,13	67.636,02	55.405,37	15.609,65	40.077,61	28.895,31	8.024,47	7.437,49	251.489,22	20.745,18	138.837,31	119.291,19	683.043,07	37.716,68
2029	32.837,18	6.459,31	68.495,00	55.953,89	15.711,12	40.714,84	29.487,67	8.192,98	7.525,67	253.903,91	20.985,83	139.739,75	120.472,17	688.234,19	38.123,00
2030	33.047,34	6.549,74	69.364,89	56.507,93	15.819,24	41.362,21	30.092,16	8.365,04	7.635,14	256.340,99	21.229,26	140.648,06	121.664,94	693.464,77	38.534,73

Negrito: Os dados reais de CTR Candeias: Ecoepesa (de 2007 até 2017) e Fox Hatzer (2018); de CTR Pernambuco (de 2011 até 2018)

Negrito: os dados reais de CTR Candeias e CTR Pernambuco juntos

Legenda

LIXÃO

ATERRO CONTROLADO

CTR CANDEIAS

CTR PE