



**UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE BAURU**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**EDVALDO JOSÉ SCOTON**

**CO-COMPOSTAGEM EM REATOR ROTATIVO HERMÉTICO PELO MÉTODO  
RESPIROMÉTRICO**

**BAURU**  
**2020**

**EDVALDO JOSÉ SCOTON**

**CO-COMPOSTAGEM EM REATOR ROTATIVO HERMÉTICO PELO MÉTODO  
RESPIROMÉTRICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia da UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão de Sistemas Produtivos

Orientadora: Profa. Associada Rosane Aparecida Gomes Battistelle

BAURU

2020

Scoton, Edvaldo José.

Co-compostagem em reator rotativo hermético pelo método respirométrico/ Edvaldo José Scoton. Bauru, 2020

231 f. : il.

Orientadora: Rosane Aparecida Gomes Battistelle

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Resíduos sólidos. 2.Compostagem. 3.Lodo de esgoto.  
4.Reator biológico. 5.Respirometria. I. Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE EDVALDO JOSÉ SCOTON, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 06 dias do mês de março do ano de 2020, às 09:00 horas, no(a) Sala de Reuniões do Departamento de Ciências Humanas / FAAC, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR do(a) Departamento de Engenharia de Estruturas / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Prof. Dr. ALOISIO COSTA SAMPAIO do(a) Departamento de Ciências Biológicas / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. BARBARA STOLTE BEZERRA do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de EDVALDO JOSÉ SCOTON, intitulada **AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSO DE CO-COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO ATRAVÉS DE MÉTODO RESPIROMÉTRICO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE

Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR

Prof. Dr. ALOISIO COSTA SAMPAIO

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. BARBARA STOLTE BEZERRA

Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA

À Deus que conduz a minha vida e a minha família, base e razão de minhas batalhas e conquistas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e poder ser um mero instrumento de suas mãos, minha esposa Benedita e minha filha Giovana, pelo apoio nas horas mais difíceis, por compreenderem que os momentos em que não estive presente, eram por objetivos maiores da nossa família.

Aos Meus pais José e Diva pelo dom da vida e todos os demais membros da família, por estarem fortes na torcida e no apoio.

À minha orientadora, amiga e incentivadora Profa. Assoc. Rosane Aparecida Gomes Battistelle, pela sua dedicação, atenção e ensinamentos, meu eterno muito obrigado!!!

Agradeço também à Profa. Assoc. Bárbara Stolte Bezerra e ao Prof. Assoc. Gustavo Henrique Ribeiro da Silva, da Faculdade de Engenharia de Bauru pela atenção e apoio. Ao Prof. Dr. Adilson Renóbio, que mesmo distante, está sempre presente nos seus ensinamentos e encorajamentos.

Muito obrigado a todos os professores e funcionários do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção e do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, que garantem a excelência do Curso.

Aos professores e colegas do Departamento de Ciências Humanas da FAAC - Faculdade Arquitetura, Artes e Comunicação da UNESP - Campus Bauru, pela compreensão e apoio nos meus pedidos de afastamento, especialmente a Roseli Cristina Nonato Pitondo, pelo incentivo em todos os momentos.

A todos os meus amigos, que de uma maneira ou outra sempre me incentivaram, me apoiaram, para que pudesse concluir mais esta etapa de minha vida.

A todos minha eterna GRATIDÃO!!

*"Não se esqueçam nunca que o meio ambiente é um bem coletivo,  
patrimônio de toda humanidade e responsabilidade de todos".*

*(Papa Francisco)*

## RESUMO

A compostagem é um conjunto de técnicas muito importante para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos, por meio do uso de tecnologias sustentáveis que processam os resíduos orgânicos originados da agricultura, agroindústria, silvicultura, resíduos orgânicos domiciliares e, ainda, o lodo de esgoto. A busca da sociedade por melhores condições ambientais, aponta para uma tendência de ocorrer um incremento substancial na quantidade de lodo a ser disposto nos próximos anos, surgindo, portanto, a necessidade de que sejam apresentadas técnicas que possibilitem um tratamento eficiente e adequado dos mesmos. O emprego do processo de compostagem no Brasil, é ainda bastante incipiente e possui alto grau de empirismo no controle e avaliação do processo, devido a falta de conhecimento técnico mais aprofundado, sendo necessário o implemento de novas formas de análise e controle eficazes. No processo avaliativo chamado método "respirométrico", utiliza-se uma nova metodologia na qual os parâmetros de degradação biológica dos resíduos não são medidos na fase sólida, mas em sua fase gasosa. A análise do lodo de esgoto pelo método respirométrico, demonstrou ser uma ferramenta, pode vir a ser muito útil, desde que sejam levados em considerações todos parâmetros apontados na literatura, buscando o equilíbrio destes parâmetros na escolha e quantificação dos resíduos. O reator rotativo hermético apresentou como vantagens a homogeneização dos resíduos, favorecendo o contato de toda a matéria orgânica com as bactérias decompositoras, acelerando o processo, e também o isolamento do odor e do contato com vetores apresentando como possibilidade de trabalhos futuros a análise das variáveis velocidade de rotação e tempo de rotação e repouso do reator e suas alterações contribuições na eficiência do processo.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Compostagem. Lodo de esgoto. Reator biológico. Respirometria.

## ABSTRACT

Composting is a very important set of techniques for the treatment of the organic fraction of solid waste, through the use of sustainable technologies that process organic waste originating from agriculture, agribusiness, forestry, household organic waste and, also, sewage sludge. Society's search for better environmental conditions points to a tendency for there to be a substantial increase in the amount of sludge to be disposed of in the coming years, therefore, the need arises for techniques to be presented that enable efficient and efficient treatment. of them. The use of the composting process in Brazil, is still quite incipient and has a high degree of empiricism in the control and evaluation of the process, due to the lack of more in-depth technical knowledge, requiring the implementation of new forms of effective analysis and control. In the evaluation process called the "respirometric" method, a new methodology is used in which the biological degradation parameters of the residues are not measured in the solid phase, but in the gas phase. The analysis of sewage sludge using the respirometric method, proved to be a tool, it may prove to be very useful, provided that all parameters pointed out in the literature are taken into consideration, seeking to balance these parameters in the choice and quantification of waste. The hermetic rotary reactor had as advantages the homogenization of residues, favoring the contact of all organic matter with the decomposing bacteria, speeding up the process, and also the isolation of odor and contact with vectors, presenting the possibility of future analysis of variables speed of rotation and time of rotation and rest of the reactor and its changes contribute to the efficiency of the process.

Keywords: Solid waste. Composting. Sewage sludge. Biological reactor. Respirometry

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de construção do trabalho .....	35
Figura 2 - Esquema da instalação piloto de laboratório para processo de compostagem de resíduos sólidos .....	36
Figura 3 - Fluxograma da metodologia de pesquisa .....	37
Figura 4 - Fluxograma do referencial teórico.....	39
Figura 5 - Hierarquia de gerenciamento dos resíduos sólidos. ....	46
Figura 6 - Classificação de RSU segundo a ABNT .....	48
Figura 7 - Classificação RSU, de acordo com a composição química- ABNT.....	49
Figura 8 - Classificação de RSU segundo a ABNT .....	49
Figura 9 - Classes de Resíduos Sólidos.....	51
Figura 10 - Forma inadequada de disposição de resíduos e rejeitos no solo: Lixão .	58
Figura 11 - Disposição de resíduos sólidos em aterro controlado .....	59
Figura 12 - Aterro sanitário: Destinação de resíduos sólidos sem impacto ambiental .....	60
Figura 13 - Índice de qualidade de aterro de resíduos no Estado de São Paulo em 2016 .....	61
Figura 14 - Rede de relacionamento de artigos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo " <i>solid waste</i> " .....	78
Figura 15 - Rede de periódicos com maior número de citações de trabalhos obtidos a partir da busca dos termos " <i>solid waste</i> " .....	81
Figura 16 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca " <i>solid waste</i> " .....	82
Figura 17 - Rede de relacionamento entre autores do Brasil com autores de outros países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca " <i>solid waste</i> " .....	82
Figura 18 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de publicações de artigos, obtidos a partir do termo de busca " <i>solid waste</i> " .....	84
Figura 19 - Representação esquemática das entradas e saídas do processo de compostagem.....	86
Figura 20 - Evolução da temperatura em uma leira de compostagem .....	89
Figura 21 - Perfil típico de temperatura em uma leira.....	91

Figura 22 - Variação do pH ao longo do processo de compostagem.....	98
Figura 23 - Compostagem através do sistema de leiras revolvidas ( <i>windrow</i> ).....	103
Figura 24 - Compostagem através do sistema de leiras estáticas aeradas ( <i>static pile</i> ).....	105
Figura 25 - Compostagem por meio dos sistemas fechados ou reatores biológicos ( <i>In-vessel</i> ).....	107
Figura 26 - Rede de relacionamento de artigos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo " <i>composting</i> " .....	119
Figura 27 - Rede de periódicos com maior número de publicações de trabalhos obtidos a partir da busca do termo " <i>composting</i> " .....	121
Figura 28 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca " <i>composting</i> " .....	122
Figura 29 - Rede de relacionamento entre autores do Brasil com autores de outros países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca " <i>composting</i> " .....	123
Figura 30 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca " <i>composting</i> " .....	125
Figura 31 - Lodo de esgoto com alta concentração de água.....	125
Figura 32 - Lodo de esgoto em processo de desidratação.....	125
Figura 33 - Rede de relacionamento de artigos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ")......	141
Figura 34 - Rede de periódicos com maior número de citações de trabalhos obtidos a partir da busca do termo (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ").....	144
Figura 35 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ") .....	145
Figura 36 - Rede de relacionamento entre autores do Brasil com autores de outros países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ") .....	145
Figura 37 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ") ..	147
Figura 38 - Protótipo de um sistema de tratamento de lodo ativado com sistema de aquisição de dados .....	149

Figura 39 - Respirômetro AIR NL desenvolvido pelo LISA - Università di Trento....	150
Figura 40 - Vista geral do reator .....	151
Figura 41 - Rede de relacionamento de artigos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ")) .....	161
Figura 42 - Rede de periódicos com maior número de citações de trabalhos obtidos a partir da busca do termo (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ")).....	164
Figura 43 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ")).....	165
Figura 44 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ")).....	165
Figura 45 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ")) .....	167
Figura 46 - Rede de autores da Unesp com autores de outros países, que apresentaram citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ")).....	168
Figura 47 - Estrutura do processo de experimentos de compostagem formada basicamente por: tambor rotativo, analisador de gases e aquisição de dados .....	169
Figura 48 - (1) Motor para rotação do reator e (2)bomba de purga .....	170
Figura 49 - (1) Entrada de ar com passagem por (2) filtro.....	170
Figura 50 - Interior do tambor rotativo, (1) entrada de ar e (2) saída de ar para o analisador de gás .....	170
Figura 51 - Exterior do tambor rotativo .....	170
Figura 52 - Tambor rotativo hermético com capacidade para 974,3cm <sup>3</sup> .....	171
Figura 53 - Visão geral do reator de compostagem de grande porte .....	171
Figura 54 - Disposição do motor(1), bomba de vácuo(2) .....	171
Figura 55 - Lateral do reator, retorno do ar analisado(1).....	171
Figura 56 - Interior do tambor rotativo, destaque para saída de ar para análise(1)	171
Figura 57 - Analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa Sick Maihak .....	172

Figura 58 - Detalhe do <i>display</i> do analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa <i>Sick Maihak</i> .....	172
Figura 59 - Detalhamento da tela principal do software desenvolvido, onde existem as opções de controle a uma tela que mostra em tempo real as variações de gases do processo de compostagem .....	173
Figura 60 - Aquisição de dados pelo computador .....	174
Figura 61 - Exemplo do relatório de dados gerado pelo <i>software</i> , onde o arquivo pode ser importado por editores de textos e planilhas. ....	174
Figura 62 – Bateladas realizadas na pesquisa.....	175
Figura 63 - Sistema de tratamento de esgoto sanitário da ETE .....	176
Figura 64 - Entrada do efluente para ser tratado na ETE.....	176
Figura 65 - Tanque de aeração para o tratamento aeróbio .....	176
Figura 66 - Tanque de equalização.....	177
Figura 67 - Decantadores.....	177
Figura 68 - Local de recebimento do lodo para ser centrifugado .....	177
Figura 69 - Lodo recebido da ETE para centrifugação.....	177
Figura 70 - Processo de centrifugação.....	177
Figura 71 - Lodo centrifugado, com 80% de umidade .....	177
Figura 72 - Visão geral da estufa de compostagem do lodo de esgoto.....	178
Figura 73 - Processo mecanizado de revolvimento do lodo de esgoto .....	178
Figura 74 - Disposição do lodo em duas baias, de 81m de comprimento e 12,8m de largura .....	178
Figura 75 - Lodo compostado após 60 dias .....	178
Figura 76 - Pesagem das Cápsulas com lodo de esgoto .....	182
Figura 77 - Avaliação da umidade por aquecimento em estufa.....	182
Figura 78 - Aferição da temperatura da estufa em 105°C .....	182
Figura 79 - Finalização do processo de avaliação da umidade, após 24h em estufa a 105°C .....	182
Figura 80 - Lodo disposto em bandeja para secagem ao ar livre.....	183
Figura 81 - Início do processo de secagem do lodo de esgoto .....	183
Figura 82 - Processo de secagem em seu estágio intermediário.....	184
Figura 83 - Resultado final do processo de secagem .....	184
Figura 84 - Processo de peneiração para obtenção da granulometria do lodo .....	184
Figura 85 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da primeira batelada ...	185

Figura 86 - Disposição do lodo no reator para início do processo de compostagem .....	186
Figura 87 - Disposição do lodo e proteção da saída e entrada de ar para evitar entupimento.....	186
Figura 88 - Reator fechado para evitar entrada e saída de gases .....	186
Figura 89 - Início do processo de rotação do reator, na primeira batelada .....	186
Figura 90 - Resultado da primeira batelada .....	188
Figura 91 - Composto gerado na primeira batelada .....	188
Figura 92 - Lodo após secagem utilizado na segunda batelada .....	189
Figura 93 - Bagaço de cana-de-açúcar utilizado na segunda batelada.....	189
Figura 94 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da segunda batelada ..	190
Figura 95 - Granulometria dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar segunda batelada.....	191
Figura 96 - Segunda batelada, co-compostagem de lodo de esgoto e bagaço de cana-de-açúcar .....	192
Figura 97 - Início do processo de compostagem da segunda batelada .....	192
Figura 98 - Resultado da segunda batelada.....	192
Figura 99 - Lodo após secagem utilizado na terceira batelada .....	194
Figura 100 - Resíduos de podas de gramíneas utilizados na terceira batelada .....	194
Figura 101 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da terceira batelada ..	196
Figura 102 - Resíduos de lodo de esgoto e poda de gramíneas no interior do reator .....	196
Figura 103 - Reator fechado para início do processo de compostagem da terceira batelada.....	196
Figura 104 - Resultado da terceira batelada, apresentando poeira no interior do reator.....	199
Figura 105 - Composto gerado na terceira batelada .....	199
Figura 106 - Lodo de esgoto utilizado na quarta batelada .....	200
Figura 107 - Resíduos de alimentos de restaurante utilizados na quarta batelada ..	200
Figura 108 - Resíduos de poda de gramíneas utilizados na quarta batelada.....	200
Figura 109 - Resíduos de bagaço de cana-de-açúcar utilizados na quarta batelada. ....	200
Figura 110 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da terceira batelada ..	201

Figura 111 - Resíduos de alimentos de restaurante depositados no reator para quarta batelada .....	202
Figura 112 - Lodo de esgoto depositado junto aos demais resíduos para quarta batelada.....	202
Figura 113 - Resultado parcial do composto da quarta batelada .....	203
Figura 114 - Adição de bagaço de cana-de-açúcar na quarta batelada .....	204
Figura 115 - Adição de resíduos de poda de gramíneas na quarta batelada .....	204
Figura 116 - Resultado da quarta batelada, apresentado colônia de fungos no interior do reator .....	205
Figura 117 - Composto gerado na quarta batelada, após ser descompactado. ....	205
Figura 118 - Resíduos gerados pelo serviço de poda que é executado constantemente no Campus Unesp de Bauru.....	206
Figura 119 - Armazenamento dos resíduos de podas em forma de leiras no Campus Unesp de Bauru .....	206
Figura 120 - Resíduos de alimentos gerados.....	206
Figura 121 - Resíduo de bagaço de cana-de-açúcar .....	206
Figura 122 - Reator hermético rotativo com capacidade para 974,27cm <sup>3</sup> de resíduos .....	207
Figura 123 - Disposição interna do reator com destaque para saída de ar para análise gasosa. ....	207
Figura 124 - Disposição de resíduos de podas no interior do reator .....	207
Figura 125 - Disposição de resíduos de alimentos de restaurante no interior do reator .....	207
Figura 126 - Disposição de bagaço de cana-de-açúcar no interior do reator.....	207
Figura 127 - Início do processo de compostagem da quinta batelada .....	207
Figura 128 - Processo de compostagem da quinta batelada após dez dias de início .....	209
Figura 129 - Substituição e alinhamento das correias do motor.....	210
Figura 130 - Tampa retirada para abertura do reator ao final da quinta batelada ...	210
Figura 131 - Resíduos depositados no eixo e nas paredes do reator ao final da quinta batelada.....	211
Figura 132 - Composto gerado ao final da quinta batelada e descompactado.....	212

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008 .....	54
Gráfico 2 - Estimativa da quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil por habitante/dia em 2000 e 2008 .....	55
Gráfico 3 - Geração de RSU Per Capita nas Regiões Brasileiras (Kg/Habitante/Dia) .....	55
Gráfico 4 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008 .....	57
Gráfico 5 - Rejeitos encaminhados para disposição em solo no Brasil nos anos de 2000 e 2008 .....	62
Gráfico 6 - Total de Lixão, aterro controlado/sanitário no ano de 2008, segundo a fonte de dados do Plano e SNIS .....	64
Gráfico 7 - Destinação: Aterros Sanitário, Controlado e Lixão .....	65
Gráfico 8 - Quantidade diária de RSU encaminhados em sua destinação final entre lixão, aterro controlado e sanitário no ano de 2008.....	66
Gráfico 9 - Incidência de papel/papelão sobre total de material recuperado baseados em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, entre os anos de 2008 a 2015 .....	66
Gráfico 10 - Incidência de plásticos sobre total de material recuperado baseados em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos. Sólidos entre os anos de 2008 a 2015 .....	67
Gráfico 11 - Incidência de metais sobre total de material recuperado, baseado em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, entre os anos de 2008 a 2015.....	67
Gráfico 12 - Incidência de vidros sobre total de material recuperado baseado em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, entre os anos de 2008 a 2015	68
Gráfico 13 - Incidência de “outros” sobre total de material recuperado baseado em dados SNIS entre os anos de 2008 a 2015.....	68
Gráfico 14 - Quantidade de artigos publicados de 1956 a 2018 utilizando o termo de pesquisa "solid waste" .....	69
Gráfico 15 - Quantidade de artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo “solid waste” .....	78

Gráfico 16 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir dos termos de busca “ <i>solid waste</i> ” .....	80
Gráfico 17 - Indicadores <i>SCImago Journal Rank</i> (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca “ <i>solid waste</i> ” ...	80
Gráfico 18 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca “ <i>solid waste</i> ” .....	81
Gráfico 19 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca “ <i>solid waste</i> ” .....	83
Gráfico 20 - Autores com maior quantidade de citações de publicações, obtidos a partir do termo de busca “ <i>solid waste</i> ” .....	83
Gráfico 21 - Quantidade de artigos publicados de 1920 a 2018 utilizando o termo de pesquisa “ <i>composting</i> ” .....	110
Gráfico 22 - Quantidade de artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo “ <i>composting</i> ” .....	119
Gráfico 23 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir do termo de busca “ <i>composting</i> ” .....	121
Gráfico 24 - Indicadores <i>SCImago Journal Rank</i> (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca “ <i>composting</i> ”	121
Gráfico 25 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir do termo de busca “ <i>composting</i> ” .....	122
Gráfico 26 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca “ <i>composting</i> ” .....	124
Gráfico 27 - Autores com maior quantidade de publicações de artigos, obtidos a partir do termo de busca “ <i>composting</i> ” .....	124
Gráfico 28 - Quantidade de artigos publicados de 1954 a 2018 utilizando termo de pesquisa (“ <i>composting</i> ” AND “ <i>sewage sludge</i> ”) .....	134
Gráfico 29 - Quantidade de artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo (“ <i>composting</i> ” AND “ <i>sewage sludge</i> ”) .....	141
Gráfico 30 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir do s termos de busca (“ <i>composting</i> ” AND “ <i>sewage sludge</i> ”) .....	143

Gráfico 31 - Indicadores <i>SCImago Journal Rank</i> (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ").....	143
Gráfico 32 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ").....	144
Gráfico 33 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ").....	146
Gráfico 34 - Autores com maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ").....	146
Gráfico 35 - Quantidade de Quantidade de artigos publicados de 1984 a 2018 utilizando termo de pesquisa (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ").....	152
Gráfico 36 - Quantidade de artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ") .....	161
Gráfico 37 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir do s termos de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ").....	163
Gráfico 38 - Indicadores <i>SCImago Journal Rank</i> (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ").....	163
Gráfico 39 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ") .....	164
Gráfico 40 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ").....	166
Gráfico 41 - Autores com maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ") .....	166
Gráfico 42 - Consumo de O <sub>2</sub> na primeira batelada.....	186
Gráfico 43 - Emissão de CO <sub>2</sub> na primeira batelada.....	187
Gráfico 44 - Relação entre o consumo de O <sub>2</sub> e emissão de CO <sub>2</sub> na primeira batelada .....	188

Gráfico 45 - Consumo de O <sub>2</sub> na segunda batelada.....	193
Gráfico 46 - Emissão de CO <sub>2</sub> na segunda batelada.....	193
Gráfico 47 - Relação entre o consumo de O <sub>2</sub> e emissão de CO <sub>2</sub> na segunda batelada .....	194
Gráfico 48 - Consumo de O <sub>2</sub> na terceira batelada.....	197
Gráfico 49 - Emissão de CO <sub>2</sub> na terceira batelada.....	198
Gráfico 50 - Relação entre o consumo de O <sub>2</sub> e emissão de CO <sub>2</sub> na terceira batelada .....	198
Gráfico 51 - Consumo de O <sub>2</sub> na quarta batelada .....	203
Gráfico 52 - Emissão de CO <sub>2</sub> na quarta batelada .....	204
Gráfico 53 - Relação entre o consumo de O <sub>2</sub> e emissão de CO <sub>2</sub> na quarta batelada .....	205
Gráfico 54 - Consumo de O <sub>2</sub> na quinta batelada.....	208
Gráfico 55 - Emissão de CO <sub>2</sub> na quinta batelada.....	208
Gráfico 56 - Relação entre o consumo de O <sub>2</sub> e emissão de CO <sub>2</sub> na quinta batelada .....	209

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008 .....	53
Tabela 2 - Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e públicos coletados no Brasil em 2000 e 2008 .....	54
Tabela 3 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, nos anos de 2000 e 2008 .....	56
Tabela 4 - Quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição em solo, considerando somente lixão, aterro controlado e aterro sanitário (t/dia) .....	61
Tabela 5 - Palavras chaves com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando-se o termo "solid waste" .....	79
Tabela 6 - Condições de inativação de parasitas e microrganismos patógenos na compostagem.....	91
Tabela 7 - Relações de C/N ótimas para a compostagem, segundo diversos autores .....	94
Tabela 8 - Composição de alguns materiais empregados no preparo do composto (resultados em material seco a 110 °C). .....	95
Tabela 9 - Palavras chaves com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando-se o termo " <i>composting</i> " .....	120
Tabela 10 - Palavras chaves com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando o termo (" <i>composting</i> " AND " <i>sewage sludge</i> ") .....	142
Tabela 11 - Palavras chaves com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando o termo (" <i>composting</i> " AND ( <i>respirometric</i> OR <i>respirometer</i> OR " <i>analyze gaseous</i> ")).....	162
Tabela 12 - Laudo de Análise de Teste de Lixiviação .....	179
Tabela 13 - Inorgânicos.....	179
Tabela 14 - Pesticidas.....	180
Tabela 15 - Outros Orgânicos .....	180
Tabela 16 - Caracterização química do lodo de esgoto utilizado no processo de compostagem.....	181
Tabela 17 - Determinação da umidade do lodo de esgoto coletado na ETE.....	183

Tabela 18 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na primeira batelada.....	184
Tabela 19 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na primeira batelada.....	185
Tabela 20 - Primeira determinação da umidade do composto da primeira batelada .....	187
Tabela 21 - Segunda determinação da umidade do composto da primeira batelada .....	187
Tabela 22 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na segunda batelada.....	189
Tabela 23 - Determinação da umidade do bagaço da cana de açúcar utilizado na segunda batelada.....	190
Tabela 24 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na segunda batelada.....	190
Tabela 25 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na segunda batelada.....	191
Tabela 26 - Total de resíduos utilizados na segunda batelada .....	191
Tabela 27 - Determinação da umidade do composto da segunda batelada.....	193
Tabela 28 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na terceira batelada.....	195
Tabela 29 - Determinação da umidade do resíduo de poda grama utilizado na terceira batelada.....	195
Tabela 30 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na terceira batelada.....	195
Tabela 31 - Total de resíduos utilizados na terceira batelada .....	196
Tabela 32 - Determinação da umidade do composto da segunda batelada.....	197
Tabela 33 - Determinação da umidade do composto da terceira batelada .....	199
Tabela 34 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na quarta batelada.....	200
Tabela 35 - Determinação da umidade do resíduo de poda grama utilizado na quarta batelada.....	200
Tabela 36 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na quarta batelada.....	201
Tabela 37 - Total de resíduos utilizados na terceira batelada .....	202

Tabela 38 - Determinação da umidade do composto da quarta batelada .....	203
Tabela 39 - Total de resíduos utilizados na quinta batelada .....	207
Tabela 40 - Determinação da umidade do composto da quinta batelada.....	211
Tabela 41 – Análise laboratorial de pH, MO e P .....	213
Tabela 42 – Análise laboratorial de macronutrientes .....	214
Tabela 43 – Análise laboratorial de SB, CTC, V e m.....	215

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).....	47
Quadro 2 - Classificação dos resíduos sólidos de acordo com o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). ....	50
Quadro 3 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).....	50
Quadro 4 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade, de acordo com a Política Nacional de Resíduos sólidos (PNRS).....	51
Quadro 5 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo "solid waste" .....	70
Quadro 6 - Diferenças entre composto estabilizado e composto não estabilizado .	100
Quadro 7 - Classificações dos processos de compostagem .....	101
Quadro 8 - Principais vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de compostagem.....	109
Quadro 9 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo "composting".....	111
Quadro 10 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo ("composting" AND "sewage sludge") .....	134
Quadro 11 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo ("composting" AND (respirometric OR respirometer OR "analyze gaseous")).....	153
Quadro 12 - Amostras dos compostos enviadas para análise laboratorial.....	213

**LISTA DE NOMENCLATURAS**

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
C/N	Relação Carbono e Nitrogênio
CE	Condutividade Elétrica
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DAE	Departamento de Água e Esgotos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IQC	Qualidade de Usinas de Compostagem
IQR	Índices de Qualidade de Aterro de Resíduos
IRD	Índice de Respiração Dinâmica
IRE	Índice de Respiração Estática
MOT	Matéria Orgânica Total
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
pH	Potencial hidrogeniônico
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
QR	Quociente Respiratório
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINIMA	Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos
SINISA	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento Básico
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento Básico
TCO	Taxa de Consumo de Oxigênio
UE	União Europeia

UNESP Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita filho”  
USEPA United States *Enviromental Protection Agency*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XX</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTA DE NOMENCLATURAS .....</b>	<b>XXIV</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>XXVI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	32
1.2 JUSTIFICATIVAS .....	32
1.3 OBJETIVO GERAL.....	33
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	34
1.5 HIPÓTESE.....	34
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	34
1.7 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	35
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>38</b>
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS - REVISÃO CONCEITUAL E BIBLIOMÉTRICA .....	40
2.1.1 <b>Legislação Ambiental no Brasil .....</b>	<b>42</b>
2.1.2 <b>Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS .....</b>	<b>45</b>
2.1.3 <b>Classificação dos resíduos sólidos.....</b>	<b>46</b>
2.1.4 <b>Panorama da disposição dos resíduos sólidos no Brasil segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. ....</b>	<b>52</b>
2.1.5 <b>Panorama da disposição dos resíduos sólidos no Brasil segundo o Sistema Nac. de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos-SINIR .....</b>	<b>63</b>
2.1.6 <b>Revisão Bibliométrica.....</b>	<b>69</b>
2.2 <b>COMPOSTAGEM - REVISÃO CONCEITUAL E BIBLIOMÉTRICA .....</b>	<b>84</b>
2.2.1 <b>Parâmetros físico-químicos que interferem no processo de compostagem.....</b>	<b>87</b>

2.2.1.1 Aeração .....	87
2.2.1.2 Temperatura .....	89
2.2.1.3 Umidade .....	92
2.2.1.4 Relação carbono/nitrogênio (C/N) .....	93
2.2.1.5 Granulometria: estrutura do material .....	96
2.2.1.6 Potencial Hidrogeniônico - pH .....	97
<b>2.2.2 Características do composto orgânico .....</b>	<b>99</b>
<b>2.2.3 Diferentes processos de compostagem .....</b>	<b>101</b>
2.2.3.1.1 Sistema de leiras revolvidas ( <i>windrow</i> ) .....	102
2.2.3.1.2 Sistema de leiras estáticas aeradas .....	104
2.2.3.1.3 Sistema de reatores biológicos .....	106
2.2.3.1.4 Vantagens e desvantagens dos sistemas .....	109
<b>2.2.4 Revisão Bibliométrica .....</b>	<b>110</b>
<b>2.3 LODO DE ESGOTO - REVISÃO CONCEITUAL E BIBLIOMÉTRICA .....</b>	<b>125</b>
<b>2.3.1 Tratamento de Efluentes e Destinação do Lodo .....</b>	<b>128</b>
<b>2.3.2 Definição de Lodo de Esgoto .....</b>	<b>129</b>
<b>2.3.3 Tratamento do Lodo de Esgoto .....</b>	<b>131</b>
<b>2.3.4 Biodigestão e Estabilização do Lodo de Esgoto .....</b>	<b>131</b>
<b>2.3.5 Revisão Bibliométrica .....</b>	<b>133</b>
<b>2.4 APLICAÇÕES DO MÉTODO “RESPIROMÉTRICO” NA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM - REVISÃO CONCEITUAL BIBLIOMÉTRICA .....</b>	<b>147</b>
<b>2.4.1 Revisão Bibliométrica .....</b>	<b>152</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>168</b>
<b>3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO UTILIZADO NAS QUATRO PRIMEIRAS BATELADAS .....</b>	<b>175</b>
<b>3.1.1 Características Físico-Químicas do Lodo de Esgoto .....</b>	<b>178</b>
<b>3.1.2 Determinação da Umidade do Lodo de Esgoto .....</b>	<b>182</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>183</b>
<b>4.1 RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA BATELADA .....</b>	<b>183</b>
<b>4.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SEGUNDA BATELADA .....</b>	<b>189</b>
<b>4.3 RESULTADOS OBTIDOS NA TERCEIRA BATELADA .....</b>	<b>194</b>

<b>4.4</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS NA QUARTA BATELADA.....</b>	<b>199</b>
<b>4.5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS NA QUINTA BATELADA .....</b>	<b>205</b>
<b>4.6</b>	<b>ANÁLISES LABORATORIAS DOS COMPOSTOS GERADOS NAS BATELADAS .....</b>	<b>212</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>216</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>220</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a industrialização, o mundo vivenciou um intenso processo da urbanização que repercutiu em um aumento significativo das populações urbanas, além das mudanças de hábitos de consumo com o passar dos anos, colaborando para o desenvolvimento de vários problemas, dentre eles o aumento da geração de resíduos e a necessidade de destiná-los corretamente (ALBUQUERQUE, 2007).

Conforme Andreottola *et al.* (2010), no final da década de 1960, surgiram as primeiras discussões acerca das relações existentes entre o homem, meio ambiente e desenvolvimento, e seguiram por toda a década de 1970, marcadas por movimentos e eventos bastante significativos do ponto de vista socioambiental, sendo realizada em dezembro de 2009, a Conferência das Partes para Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas, em Copenhague, Dinamarca, no entanto, os líderes mundiais somente proclamaram declarações políticas, devido a desentendimentos a respeito das metas dos países ricos, emergentes e pobres.

Ainda segundo este autor, a preocupação com a destinação dos resíduos sólidos tem alcançado patamares cada vez maiores em todos os setores da sociedade. Esta preocupação aumentou devido à crescente produção de resíduos nos grandes centros urbanos e pela evidente negligência resultante do Poder Público, Legisladores, Administradores.

Segundo Fadini *et al.* (2001), a primeira ação tomada pelos governos, logo após a Revolução Industrial, foi a de tratar o resíduo como um problema que devesse ser escondido da sociedade, passando a depositá-lo em locais distantes. Esses locais, no entanto, foram rapidamente alcançados e até mesmo incorporados em decorrência da explosão urbana, um reflexo do próprio desenvolvimento industrial, sendo notório o despreparo das cidades em acompanhá-lo.

Os resultados dessas ações foram claros e imediatos, além de resultarem em uma aproximação da sociedade e aumentarem os problemas com saneamento básico e riscos de contaminação, os locais de disposição tornaram-se cada vez mais escassos.

O grande problema de espaço físico para o descarte dos resíduos, fez com que a reciclagem se tornasse uma alternativa para o seu reaproveitamento. Conceitualmente, reciclagem é um conjunto de técnicas que tem por finalidade aproveitar os resíduos e reutilizá-los em um novo ciclo de produção. Com o passar

do tempo, reciclar deixou de ser apenas um conceito para tornar-se uma prática (TOCHETTO, 2004).

A falta de locais para a sua disposição final adequada e técnicas cada vez mais onerosas para o seu tratamento tem levado muitos municípios a colocarem em prática uma Política de Gerenciamento Integrado, que contemple, entre outras medidas, a redução na fonte, a reutilização, a reciclagem, a compostagem e a disposição em aterros, de forma conjunta (SILVA, 2009).

A aprovação da Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, após vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional, marca o início de uma articulação institucional envolvendo os três entes federados - União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade civil na busca de soluções para os graves problemas causados pelos resíduos, que vem comprometendo a qualidade de vida dos brasileiros, e que estabelece princípios, objetivos, diretrizes, metas e ações, e importantes instrumentos, tais como o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que contemplará os diversos tipos de resíduos gerados, alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, bem como metas para diferentes cenários, programas, projetos e ações correspondentes.

O Art. 36. da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, e que também cabe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, observado, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, com destaque para a implantação de sistemas de compostagem para os resíduos sólidos orgânicos além de dar disposição final ambientalmente adequada aos resíduos e rejeitos.

Na busca de soluções para o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos, encontramos o processo de compostagem, que pode ser considerado uma das alternativas mais adequadas sob o ponto de vista ambiental para que possa ter após o tratamento, uma correta destinação, promovendo uma maior e mais apropriada reciclagem, em termos de material e de energia, quando comparadas com outros métodos. A compostagem é um processo biológico em que os microrganismos transformam a matéria orgânica, num material semelhante ao solo, a que se chama composto, e que pode ser utilizado como adubo, mas que pode ocorrer através de um conjunto de técnicas aplicadas para controlar a essa decomposição de materiais

orgânicos, com a finalidade de obter, no menor tempo possível, um material estável, rico em húmus e nutrientes minerais (KIEHL, 2008).

No entanto, o emprego do processo de compostagem no Brasil, é ainda bastante restrito, quando comparado ao método do aterro sanitário, principalmente pelo fato de exigir maior investimento inicial, apresentar maior dificuldade operacional e custo unitário de tratamento bem superior ao referido método, além do fato de ocorrerem experiências negativas no passado, pelo alto grau de empirismo utilizado no controle e avaliação do processo, por falta de conhecimento técnico mais aprofundado (AKUTSU, 2009).

Existem várias tentativas para reproduzir, em escala laboratorial o processo de compostagem, no entanto, a reprodução em escala de laboratório não é tarefa muito simples, deve analisar várias condições e considerações (PETIOT *et al.*, 2004). O primeiro fator está associado com a qualidade ou a composição de resíduos, sendo a composição extremamente variada de resíduos sólidos no espaço e no tempo, uma das dificuldades na obtenção e fixação de certos parâmetros de concepção.

Além das questões de o aspecto qualitativo do resíduo, vários outros parâmetros interferem no processo de compostagem: umidade, aeração, temperatura, relação entre carbono/nitrogênio, proporção de tamanho de partícula, e pH. Estes aspectos geram índices que são utilizados para a avaliação e monitoramento da atividade biológica no processo de compostagem (HERBETS, 2005).

Na presente pesquisa, aborda-se o método “respirométrico”, desenvolvido no projeto experimental realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Campus Bauru desde o ano de 2009, e também em continuidade ao trabalho de dissertação de mestrado do autor, em que se utiliza de uma nova metodologia para avaliação, acompanhamento e controle operacional do processo de compostagem, no qual os parâmetros de degradação biológica dos resíduos orgânicos, não são mensurados na fase sólida, e sim na fase gasosa, buscando-se a aplicação do protótipo em reatores de grande porte.

## 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Avaliando-se as variáveis do processo de co-compostagem de lodo de esgoto, resíduos de poda, resíduos de restaurante e resíduos de bagaço de cana, através da análise gasosa em reator hermético rotacional, é possível dimensionar e construir reatores industriais de compostagem? Quais as proporções de resíduos e os parâmetros mais eficazes?

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) coloca em seu Art. 54. que a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, observado o disposto, deverá ser implantada em até quatro anos após a data de publicação, ou seja, 2 de agosto de 2014, porém ainda em 2020 este processo está estagnado, necessitando de novas tecnologias para a destinação correta dos resíduos sólidos urbanos.

A PNRS define como formas ambientalmente adequadas para a destinação e tratamento de resíduos (inclusive o lodo de esgoto), a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, e ainda como a disposição final a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Dentre os resíduos que são destinados aos aterros sanitários, encontra-se o lodo de esgoto. As formas convencionais de disposição final do lodo de esgoto onde simplesmente era depositado no solo ou no mar foi proibido ou tornou-se restrito devido ao endurecimento da legislação em todo o mundo (RODRIGUEZ *et al.*, 2013).

No âmbito da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, em seu Art. 36 a PNRS incumbe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, observado, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, entre outras ações, a implantação do sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articulação com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido.

A moderna Engenharia utiliza o capital, a tecnologia, o gerenciamento e os recursos naturais como meios de produção de bens, dos quais a sociedade humana necessita e se beneficia. Neste processo de produção e no uso desses bens são gerados resíduos, que se não adequadamente tratados e/ou destinados, podem ocasionar danos à natureza e também aos seres humanos (LOPES, 1999).

Neste sentido, é primordial a pesquisa de métodos e padrões de produção e consumo, tendo como base a “Regra dos três erres”: reduzir, reutilizar e reciclar materiais usados nos sistemas de produção e consumo e garantir que os resíduos possam ser assimilados pelos sistemas ecológicos e que protejam as capacidades regenerativas da Terra (CAMARGO, 2002).

A compostagem é uma alternativa para um tratamento biológico que garanta esta assimilação dos resíduos provenientes de matéria orgânica, mas segundo Petiot (2004), e apesar das diversas pesquisas já desenvolvidas, há necessidade de um melhor entendimento do processo de compostagem, necessitando-se prosseguir e aprofundar as pesquisas, devido a inúmeras dúvidas reinantes sobre o processo.

A ética ambiental aponta como caminho a ser seguido, a busca de uma consciência ética coletiva, garantindo o direito a todas as gerações de viver em um ambiente equilibrado, promovido pelo desenvolvimento sustentável. Para se atingir esse objetivo, é necessário pesquisar soluções adequadas, buscando inovações tecnológicas que reparem problemas anteriores e previnam novos problemas.

### **1.3 OBJETIVO GERAL**

Os objetivos da presente pesquisa consistem em avaliar através da análise gasosa do processo de compostagem de resíduos orgânicos, aqui denominado método respirométrico, obtendo parâmetros avaliativos da degradação da matéria orgânica, além de estudar e detalhar formas para melhor compreensão dos processos de compostagem. Especificamente objetiva-se analisar através do método respirométrico, processos de co-compostagem de lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto (ETE) com outros resíduos orgânicos, buscando aumentar a eficiência do aproveitamento dos resíduos orgânicos, desenvolvendo um protótipo, viável técnica e economicamente, para construção de reatores em escala real.

#### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Efetuar pesquisa bibliográfica sobre os temas da pesquisa e analisar bibliometricamente os resultados obtidos;
- Realizar a montagem e aferição dos equipamentos a serem utilizados no experimento;
- Acompanhar e analisar, através do método “respirométrico”, processos de co-compostagem de lodo aneróbico de estação de tratamento de esgoto com outros resíduos orgânicos;
- Realizar experimentos em reator com escala real, avaliando os parâmetros do processo de compostagem;
- Avaliar a os índices de nutrientes e matéria orgânica presentes no composto.

#### 1.5 HIPÓTESE

Através de observação em tempo real do experimento de compostagem em tambor hermético rotativo, analisado em sua forma gasosa e acompanhamento digitalizado e on-line, pode-se intervir no experimento a qualquer instante buscar variáveis que melhorem e favoreçam o aproveitamento da matéria orgânica, associado à redução do tempo de processamento. A análise laboratorial indicará, após encontrar a melhor forma de processamento, a qualidade do composto gerado e variáveis que permitam o dimensionamento e construção de reatores industriais de compostagem.

#### 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído de 06 (seis) seções, no sentido de contemplar todos os objetivos desta pesquisa. Além desta primeira seção introdutória, as demais estão assim discriminadas:

a) Seção 2: Referencial teórico da Tese, que se inicia com a discussão sobre os resíduos sólidos, e aborda os temas resíduos sólidos, compostagem, lodo de esgoto e método respirométrico (análises gasosas) do processo de compostagem.

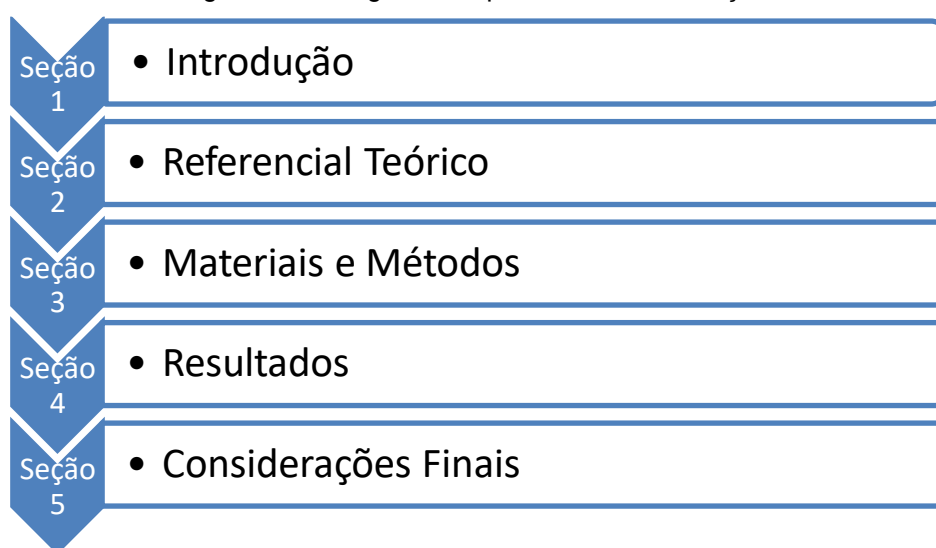
b) Seção 3: Materiais e métodos empregados na pesquisa; em ensaios laboratoriais, denominados de bateladas.

c) Seção 4: Apresentação dos resultados obtidos; através de análises de Gráficos e Tabelas.

d) Seção 5: Conclusões obtidas, contribuições que o estudo proporcionou, suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

As etapas de desenvolvimento do trabalho podem ser observadas conforme apresentado na Figura 1:

Figura 1 - Fluxograma do processo de construção do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 1.7 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este trabalho foi realizado e fundamentado, inicialmente, através de pesquisa bibliográfica interdisciplinar, identificando as teorias dos autores que tratam dos diversos assuntos relacionados à temática escolhida, utilizando-se da análise de artigos em periódicos, capítulos de livros, teses e dissertações, publicações em meios eletrônicos, entre outros.

Quanto à sua natureza, a metodologia a ser utilizada foi a pesquisa aplicada experimental, sendo seus desenvolvimentos conduzidos em uma instalação piloto de compostagem montada nas dependências do laboratório de resíduos sólidos da Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru.

O projeto é composto por três partes principais:

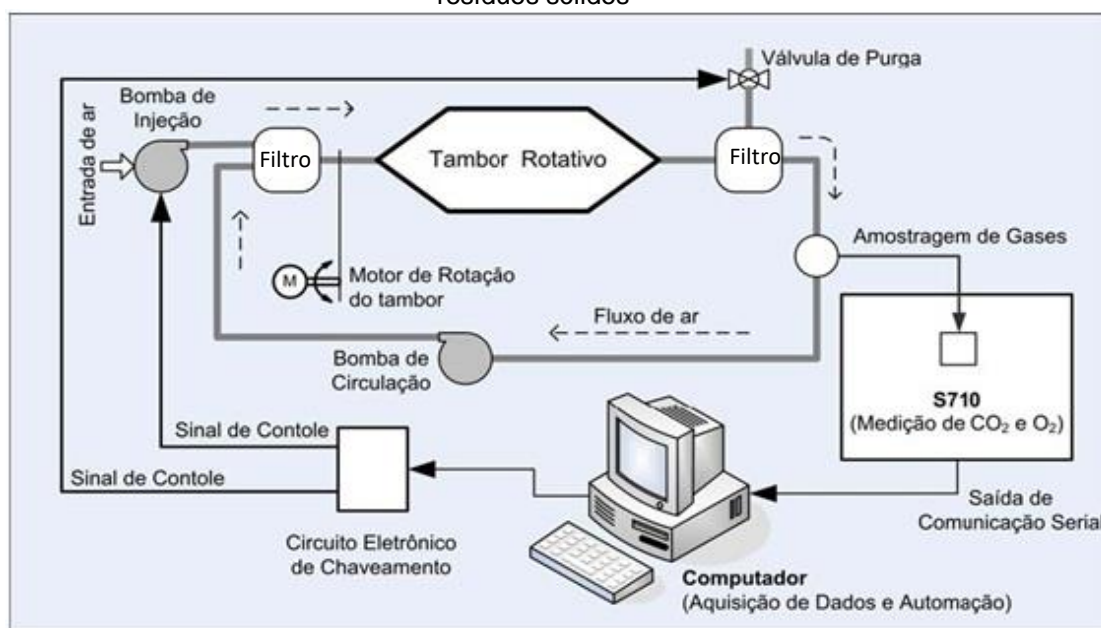
1 - Reator piloto para compostagem de resíduos: o reator consiste de um “tambor rotativo”, que apresenta um volume interno útil de 90,1 litros, e na fase final do experimento um reator com capacidade de 980 litros.

2 - Analisador de gases CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>: o analisador é um dispositivo modelo S710, fabricado pela empresa *Sick Maihak*. Este equipamento tem uma interface de comunicação serial que envia os valores medidos consecutivamente em períodos específicos de tempo.

3 - Computador para coleta de dados: o analisador de gases permite a conexão, através de uma saída serial, a um computador que recebe e processa estas informações.

O esquema da montagem experimental pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema da instalação piloto de laboratório para processo de compostagem de resíduos sólidos



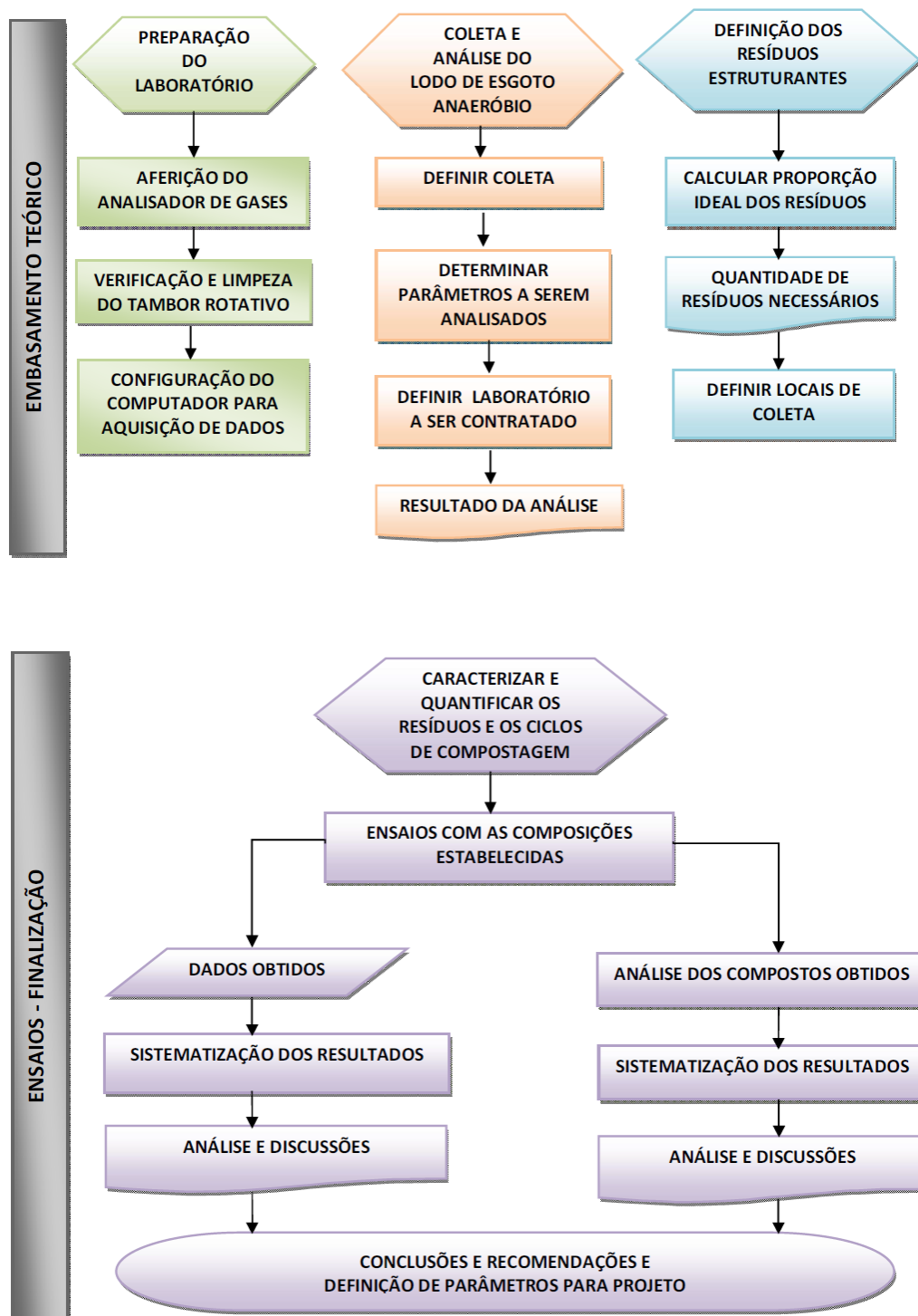
Fonte: Adaptado pelo autor de Martins *et al.*, 2009.

Quanto a abordagem do problema, a pesquisa é quantitativa, pela realização de um processo de investigação de forma a quantificar os dados coletados, em ciclos completos de processos de compostagem de matéria orgânica e também qualitativa, verificando a confiabilidade e precisão dos dados obtidos e sua utilização como parâmetros de análise e intervenção no processo de compostagem e aplicações em projetos para processamento em larga escala.

Verifica-se por meio da Figura 3, um fluxograma da metodologia a realizada para obtenção dos dados experimentais, sendo dividido em um embasamento teórico, buscando-se a escolha dos métodos e organização do laboratório e ensaios, onde a

estrutura do laboratório será priorizada, garantindo a confiabilidade científica dos dados obtidos.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo buscou-se analisar as contribuições teóricas que serão utilizadas para a estruturação deste estudo. Neste sentido, o referencial teórico está dividido em quatro capítulos, cada capítulo foi subdividido em dois grandes eixos, sendo que no primeiro foram pesquisados os referenciais teóricos mais inovadores.

Foram contempladas as literaturas conceituais, por meio de pesquisas em livros e artigos consolidados, recebendo a denominação de “Revisão Conceitual”, encadeando assuntos selecionados de acordo com o as palavras-chave que regem a pesquisa.

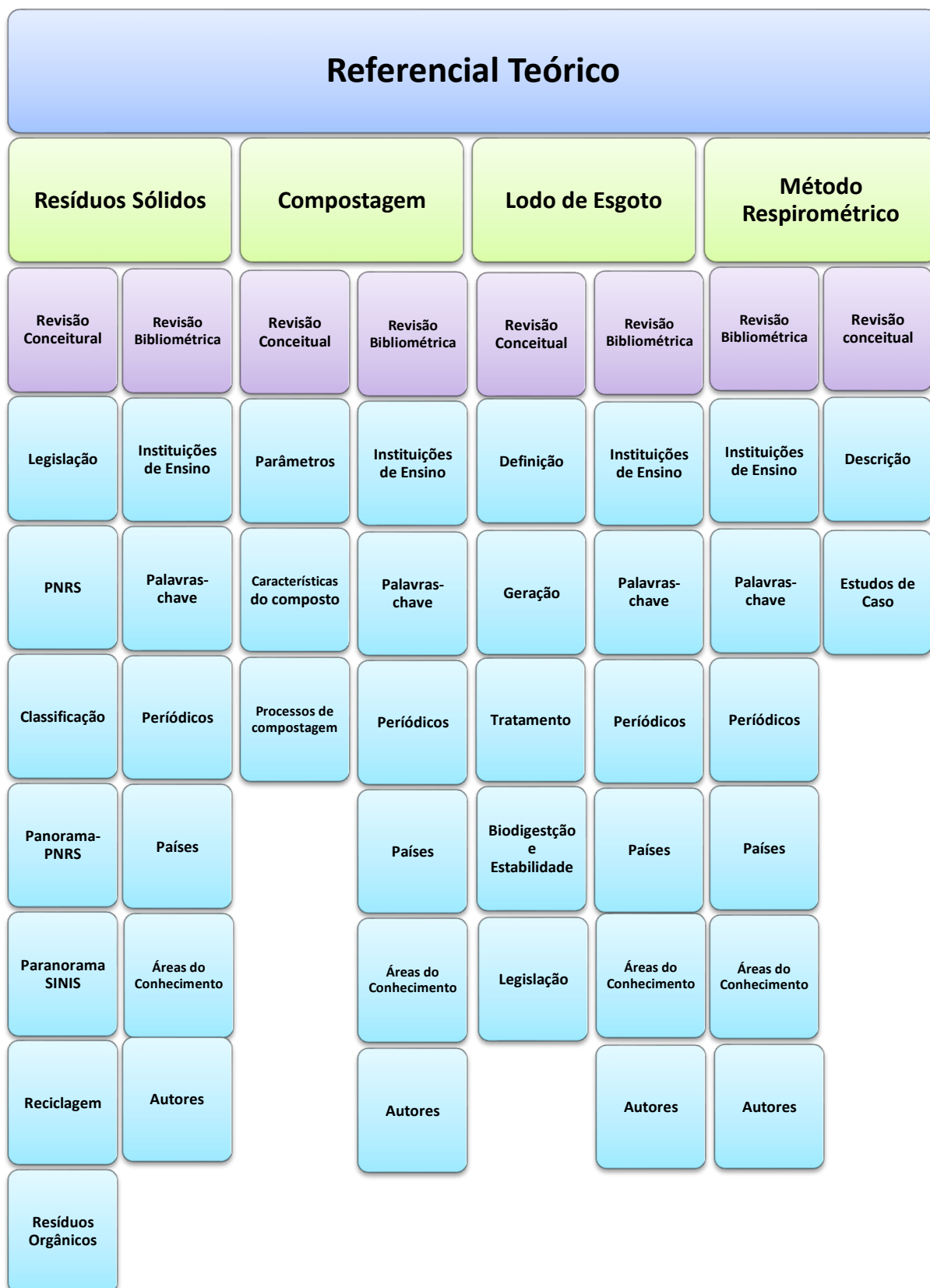
No segundo eixo denominado “Revisão Bibliométrica”, realizado por meio de pesquisa na *SciVerse Scopus*, um banco de dados de resumos e citações de artigos para periódicos acadêmicos que abrange cerca de 19,5 mil títulos de mais de 5.000 editoras internacionais, de propriedade da *Elsevier* e disponibilizado na *Web*. Neste eixo, através de uma pesquisa bibliométrica e análise de conteúdo dos artigos selecionados observando-se o seu número de citações em periódicos acadêmicos.

Ainda neste eixo, foram construídos gráficos após análise dos dados, apresentando as pesquisas e autores mais citados, e a seguir construído as redes de relacionamento destes autores por meio do *software VOSviewer*.

Para melhor ilustrar a composição do referencial teórico, construiu-se a Figura 4, onde está apresentada essa estrutura por meio de fluxograma, indicando os quatro capítulos, baseados nas palavras-chave utilizadas na pesquisa:

- a) Capítulo 1 - resíduos sólidos - discutiu-se um histórico e toda a problemática envolvendo os resíduos sólidos;
- b) Capítulo 2 - compostagem - abordou-se os trabalhos mais recentes sobre o tema e os conceitos fundamentais;
- c) Capítulo 3 - lodo de esgoto - onde foram abordados os temas envolvendo compostagem e lodo de esgoto;
- d) Capítulo 4 - método respirométrico - pesquisados os trabalhos envolvendo a análise do processo de compostagem pelo método respirométrico.

Figura 4 - Fluxograma do referencial teórico



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS - REVISÃO CONCEITUAL E BIBLIOMÉTRICA

A história do “lixo” está ligada ao processo civilizatório humano, pois quando deixamos de ser nômades e começamos a nos fixar no território, passamos a conviver com os resíduos gerados. Esta palavra provém do latim *lix*, que significa *lixívia* ou cinzas. Também do latim provém o termo *resíduo*, *residuu*, que significa o que sobra (PINHO, 2011).

Seguindo o mesmo princípio ideológico, Santaella *et al.* (2014), acreditam que os primeiros acúmulos de materiais residuais provenientes das atividades antrópicas, surgiram exatamente quando o homem deixou de ser nômade, passando a habitar locais inertes. Os autores pressupõem que o primeiro despejo municipal de resíduos sólidos, ocorreu em Atenas, especificamente; Grécia Antiga, por volta de 400 anos a.C.

Os resíduos sólidos, de acordo com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas - (ABNT) (2004), são resíduos que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, podendo se apresentar nos estados físicos sólido e semissólido. Estão incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente, inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Santaella *et al.* (2014), revelam que a definição de resíduos sólidos tem se alterado à medida que o tempo passa, sempre em função dos avanços tecnológico, da conscientização ambiental, e da necessidade atrelada ao valor econômico de realizar o reaproveitamento de materiais que não são úteis para um objetivo em específico, mas podendo servir de matéria-prima para outro.

De acordo com Rodrigues (2011), na Idade Média as pessoas tinham uma relação tão íntima com os resíduos, que hoje nós poderíamos considerar promíscua, onde os animais mortos eram jogados nas vias de circulação, cadáveres eram enterrados em igrejas, sendo os excrementos amontoados até serem levados para fora de casa, e mesmo assim as pessoas não se sentiam mal com essa coabitação com os resíduos.

Para o autor, por mais que a vida social nos leve a produzir resíduos inevitavelmente, nem sempre foi dessa maneira, defendendo que o ponto de partida consiste na Idade Média, quando as mentalidades e sensibilidades medievais foram menosprezadas pela cultura capitalista e industrial, fazendo surgir o espaço para a problemática relacionada aos resíduos.

Somente a partir do século XVIII, com as influências do Iluminismo e da Revolução Industrial, os resíduos começam a ser separados da sociedade por adquirirem uma imagem negativa e passarem a ser de fato lixo. Assim, o que é considerado detestável e inaproveitável.

As abordagens sobre o assunto ganharam espaço primordialmente na década de 60 - 70, a partir da realização de nomeadas conferências, como a de Estocolmo sobre ambiente humano e Clube de Roma. Elas foram a consequência de debates, sobre os riscos da degradação do meio ambiente que, ao qual começou nos anos 60, e ganharam no final dessa década e no início dos anos 70 uma certa densidade, que possibilitou a primeira grande discussão internacional culminando na Conferência de Estocolmo em 1972 (BRUSEKE, 1994).

Outro argumento que defende o mesmo princípio, consiste em Dias (2011), afirmando que a Revolução Científico - Tecnológica, tradicionalmente conhecida como Revolução Industrial, provocou profundas alterações no meio ambiente natural, o que direcionou para a perspectiva de sua destruição.

O problema, consiste no fato de que com o desenvolvimento econômico desordenado, houve um progresso do qual negativamente afetou os recursos naturais, devido ao seu uso exacerbado e descontrolado. Assim, surgiu o desenvolvimento econômico e, também, a degradação contínua dos recursos ambientais. Dessa forma, os mecanismos e formas de produção desse processo industrial, acrescidos da exploração intensiva e sistemática sobre o meio ambiente, generalizaram - se e se espalharam descontroladamente, sem prever os impactos ambientais que afeta todo o planeta ainda nos tempos contemporâneos.

Segundo Albuquerque *et al.* (2007), na formação e desenvolvimento das cidades, e mais ainda com a Revolução Industrial quando uma importante parcela da população rural dirigiu-se em massa para as cidades, originando um importante crescimento urbano e, por outro lado, quando teve início o uso intensivo dos recursos do planeta, a problemática da gestão dos resíduos agravou-se e o seu mau domínio começou a dar origem aos primeiros problemas ambientais graves.

Segundo Mellanby (1982), foi a partir do crescimento populacional e com a urbanização que o setor de geração de resíduos tornou - se um fator explícito e relevante, uma vez que os mesmos começaram a causar impactos negativos sobre a sociedade. Inicialmente, os efeitos eram atrelados e observados à poluição atmosférica e hídrica.

Ainda para Albuquerque *et al.* (2007), na concepção técnica o resíduo, deve ser visto e analisado sob o prisma biológico, assim resíduo orgânico é todo resíduo que tem origem animal ou vegetal, ou seja, que recentemente fez parte de um ser vivo. Numa linguagem mais técnica e moderna, abordamos os resíduos sólidos, sendo seu componente biológico a matéria orgânica, mas da mesma forma oriundos dos seres vivos, animais e vegetais. Quanto às características físicas, os resíduos sólidos orgânicos são classificados como molhados.

Com a formação e o desenvolvimento das cidades, e mais ainda com a Revolução Industrial, quando uma importante parcela da população rural dirigiu-se em massa para as cidades, originando um importante crescimento urbano e, por outro lado, quando teve início o uso intensivo dos recursos do planeta, a problemática da gestão dos resíduos agravou-se e o seu mau domínio começou a dar origem aos primeiros problemas ambientais graves (ÂNGULO *et al.*, 2010).

### **2.1.1 Legislação Ambiental no Brasil**

Devido à trajetória evolutiva a respeito da geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU), atualmente, se faz obrigatório o cumprimento de regras e parâmetros legislativos ambientais, buscando eliminar ou reduzir a sua geração, ou controlar, monitorar e destinar adequadamente cada tipo residual existente e produzido pela população.

Segundo Pedro e Frangetto (2004), desde o seu surgimento, o homem interage com o meio ambiente, porém, a harmonia entre o homem e a natureza é obstruída pelo aumento populacional, junto do consumo em larga escala dos recursos ambientais.

Ainda seguindo os princípios de Pedro e Frangetto (2004), há duas fases atreladas a concepção da legislação no setor ambiental, sendo a primeira, proteção ambiental setorial, não sendo exclusivamente específica ao meio ambiente, como

juridicamente protegido. A segunda, considera a especificidade do meio ambiente fazendo com que as normas de controle ambiental, caminhem para o aperfeiçoamento.

De acordo com Farias (2008), a primeira legislação com âmbito ambiental surgiu na época do descobrimento em Portugal, com as Ordenações Afonsinas, cujo trabalho de compilação foi concluído no ano de 1446 durante o reinado de Dom Afonso IV. O autor defende que é possível encontrar na Ordenações Afonsinas algumas referências à preocupação com o meio ambiente, a exemplo do dispositivo que tipificava como crime de injúria ao rei o corte de árvores frutíferas.

Em 1521, a tipificação do corte de árvores frutíferas passou a ser punida com o degrado para o Brasil quando a árvore abatida tivesse valor superior a trinta cruzados. O primeiro Código Criminal de 1830 tipificou como crime o corte ilegal de madeira e a lei nº 601/1850 discriminou a ocupação do solo no que diz respeito a ilícitos como desmatamentos e incêndios criminosos.

Santaella *et al.* (2014) defendem que esse seguimento de retirada madeireira está em conjunto com a retirada de minérios, e a retirada inadequada de ambas matérias-primas, ocasionou impactos ambientais de níveis catastróficos, uma vez que o Brasil se encontrava em processo da conquista portuguesa e hispânica no continente latino-americano, conquista a qual, acarretou outros problemas de origem aos danos ambientais; como as queimadas e as propagações de produção agrícola, em grandes latifúndios.

Contudo, conforme afirmado por Farias (2008), era exercido de forma incipiente o controle sobre os recursos naturais, porquê de um lado éramos regidos pelo utilitarismo, visto que só se tutelava o recurso ambiental que tivesse valoração econômica, e de outro pela fragmentação do objeto, o que negava ao meio ambiente uma identidade própria, e em consequência até do aparato legislativo existente.

Segundo Pedro e Frangetto (2004), a nível brasileiro, em consonância com o aspecto ambiental da economia luso-brasileira, baixou-se no Brasil Colônia, em 1760, um Alvará Real de Proteção dos Manguezais, com intuito de evitar a ocupação urbana e conservar os manguezais intactos em todo o território brasileiro, porém, a norma foi revigorada somente em meados do século XIX.

Brollo e Silva (2001) afirmam que foi somente nos anos 1970 que surgiram de fato as políticas de controle de resíduos sólidos, as quais buscavam estabelecer normas referentes à forma mais adequada de coleta e, principalmente, de disposição

do material descartado. Defendem ainda, que foi nos anos 80 que se enfatizou as formas de pré-tratamento e a destruição desse material. Atualmente a tendência nos países industrializados é o estabelecimento de critérios e incentivos que permitam a implantação de programas de prevenção e redução de resíduos na fonte geradora, assim como programas de recuperação dos recursos dos resíduos.

Dessa forma, Santaella *et al.* (2014) expõem que os órgãos públicos promoveram a proteção ambiental a partir de 1940 - aproximadamente 20 anos, os órgãos concediam licença para promover a exploração dos recursos naturais. Foi em 1960 que o Brasil sofreu pressões de nível internacional, levando a criar um senso mais rigoroso quanto ao meio ambiente. De acordo com Rodrigues, Filho e Pereira (2016), outro fator atrelado à questão de organização do setor de um órgão público, consiste na existência de monopólios que podem ser privados ou governistas, sendo ainda; em alguns casos; misto. Assim, a questão quanto a política e o aumento de custos com RSU, segundo os autores, pode ser relacionada ao tipo de monopólio existente. Ainda segundo os mesmos autores, as metodologias de governança são a maneira pela qual uma instituição se organiza para oferecer o bem ou o serviço. No caso dos RSU, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), a melhor maneira de se ordenar, é a partir de leis, as quais são norteadas pela PNRS.

O grande marco brasileiro na esfera da política ambiental, ocorreu em 1981, com a criação da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), para assessorar nas decisões governamentais a respeito do setor natural, posteriormente, surgiram os principais órgãos defensores do meio ambiente, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

A Lei nº 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, é o primeiro grande marco em termos de norma de proteção ambiental no Brasil. Essa legislação definiu de forma avançada e inovadora os conceitos, princípios, objetivos e instrumentos para a defesa do meio ambiente, reconhecer ainda a importância deste para a vida e para a qualidade de vida.

Especificamente sobre os Resíduos Sólidos Urbanos, uma importante lei se faz essencial quanto à tomada de decisões em parâmetros de legislações ambientais brasileiras, com foco no manejo de resíduos sólidos urbanos, a qual foi aprovada em 2 de agosto de 2010, a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

### 2.1.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS

A política ambiental brasileira, de acordo com Santaella *et al.* (2014), é viabilizada pelas leis ambientais, podendo ter iniciativa do poder executivo, legislativo ou judiciário, os quais necessitam obter primeiramente, o aval de aprovação do Congresso Nacional. Uma vez que uma lei é aprovada pelo Congresso Nacional, deve ser regulamentada pelo poder executivo, o qual realizará todo o detalhamento da lei em questão.

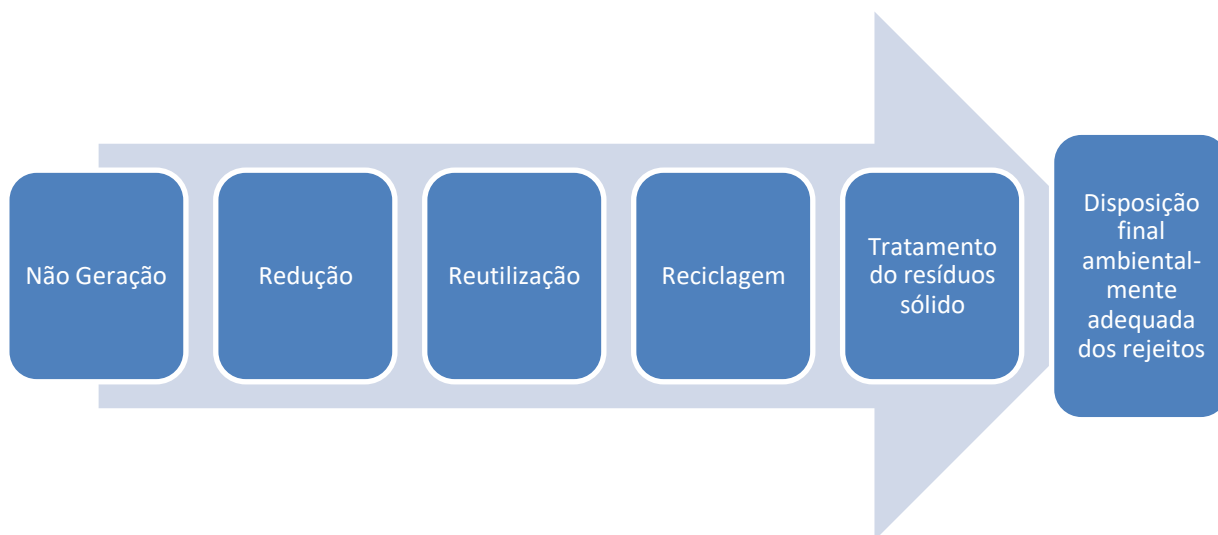
De acordo com Faria (2012), os atos normativos menos complexos, são editados nos âmbitos estadual e municipal, pelo poder legislativo, executivo e autarquias. Um exemplo desse procedimento, consiste na PNRS, a qual afeta os estados e municípios, precisando de leis estaduais e municipais, com atos normativos com objetivo de criar ou discriminar as leis, as quais, serão estabelecidas pelas políticas públicas, sendo firmada após uma prolixa discussão, da qual participaram representantes de órgãos das três esferas governamentais, de segmentos empresariais os mais diversos e do comércio varejista, de entidades ambientalistas e de defesa dos consumidores, de cooperativas de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis, e de especialistas na gestão de resíduos sólidos, sendo assim, um importante documento norteador das diretrizes a respeito do adequado gerenciamento dos RSU.

Costa (2015) faz uma breve análise sobre o histórico da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil começando com o ano de 1989, quando foi apresentado o Projeto de Lei do Senado Federal Nº 354/89, que dispunha sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde. Tal Projeto de Lei tramitou e foi melhorado na Câmara dos Deputados (Projeto de Lei Nº 203/91), adquirindo o perfil de processo legislativo. Em 2006 ocorreu a aprovação de um substitutivo pela Comissão Especial da Política Nacional dos Resíduos e em 2007, a proposta do Executivo Federal, que serviu de base à discussão final para a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos, foi submetida à apreciação do Plenário da Câmara dos Deputados, sendo sancionada em agosto e regulamentada em dezembro de 2010.

A PNRS, conforme argumentado por Faria (2012), traz preceitos inovadores, como a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto e o sistema de logística reversa e principalmente; hierarquiza a ordem de prioridade a ser

observada na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, conforme observa-se por meio da Figura 5.

Figura 5 - Hierarquia de gerenciamento dos resíduos sólidos.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado da PNRS.

Para a disposição final poderão ser empregadas tecnologias para recuperação energética dos RSU, porém sua viabilidade técnica e ambiental deve ser comprovada, bem como o controle de emissão de gases deve ser feito. Para tais ações pode-se contar com o que está disposto na PNRS, e nos Planos Nacionais, Estaduais e Municipais de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

### 2.1.3 Classificação dos resíduos sólidos

O significado de resíduos sólidos é bastante amplo. Para Albuquerque *et al.* (2007) os resíduos sólidos são detritos de origens orgânicas, inorgânicas, inertes, radioativas, hospitalares, industriais e que quando bem administrados, muitos deles podem vir a serem diretamente aproveitados e/ou comercializados.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os resíduos sólidos podem ser classificados em três classes conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

CLASSE	CLASSIFICAÇÃO
Classe I	Resíduos Perigosos.
Classe II	Resíduos Não Inertes
Classe III	Resíduos Inertes

Fonte: Adaptado pelo autor da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2011.

Ainda segundo a norma em questão, define-se por resíduos sólidos como sendo resíduos que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, podendo se apresentar nos estados físicos sólido e semissólidos.

Estão incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente, inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

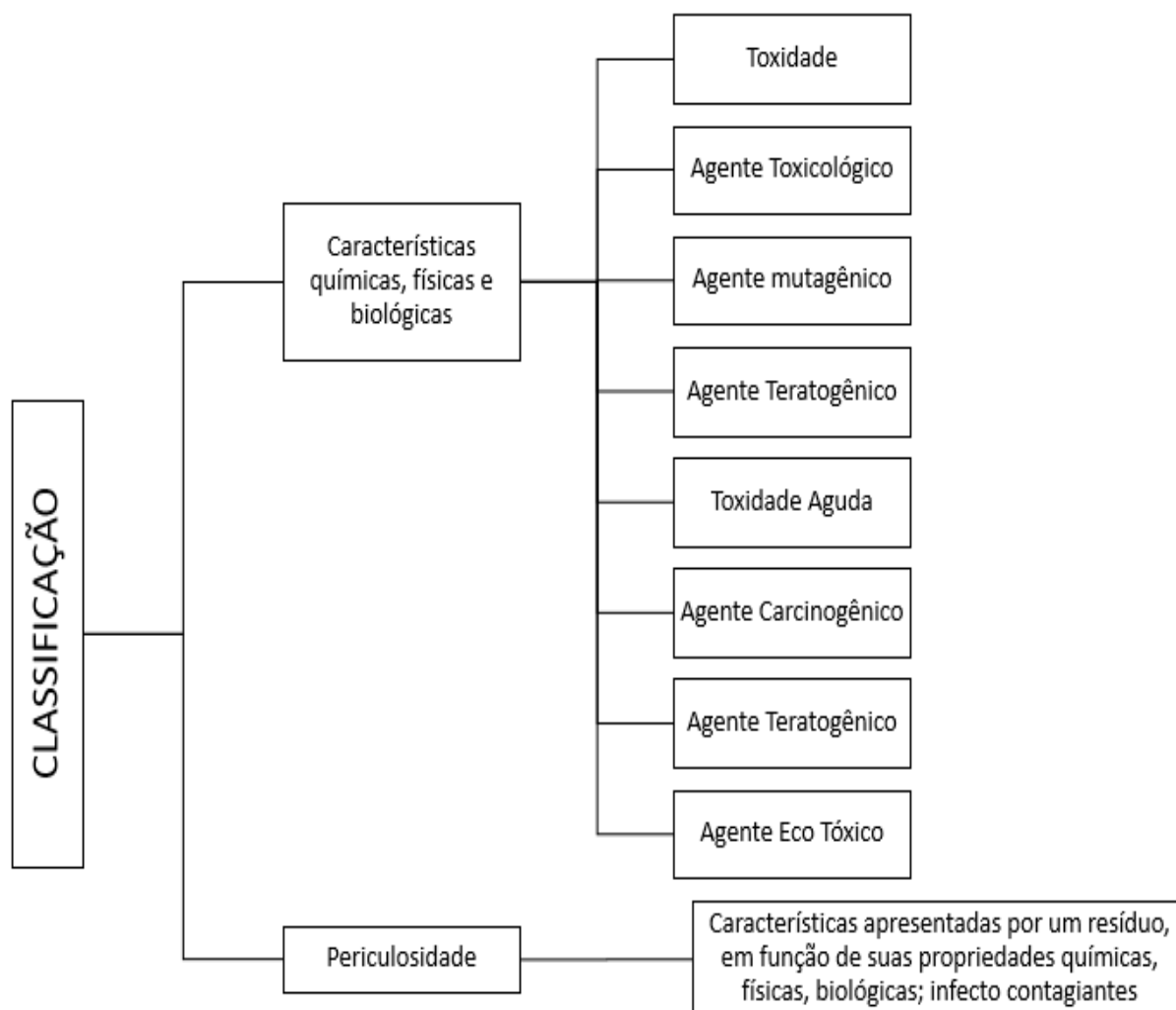
A identificação dos resíduos, junto de sua classificação, de acordo com a ABNT e a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos (ABETRE), deve seguir uma série de levantamento de características físicas, químicas e biológicas.

A ABNT NBR 10004:2004 também define a periculosidade de um resíduo:

“3.2 periculosidade de um resíduo: Característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, pode apresentar: a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.”

A classificação dos RSU, de acordo com as características químicas, físicas e biológicas e também quanto a periculosidade dos resíduos, segundo a ABNT, pode ser melhor entendido por meio da observação da Figura 6.

Figura 6 - Classificação de RSU segundo a ABNT



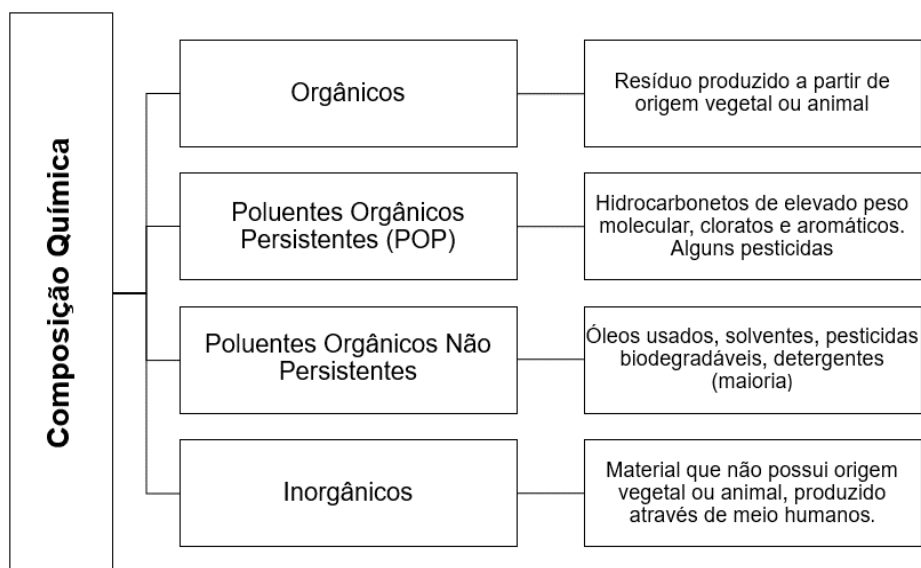
Fonte: Elaborado pelo autor, com base na ABNT.

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

Dessa forma, é preciso considerar a composição química dos RSU, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme é apresentado por meio da Figura 7.

Figura 7 - Classificação RSU, de acordo com a composição química- ABNT



Fonte: Elaborado pelo autor, com base na ABNT.

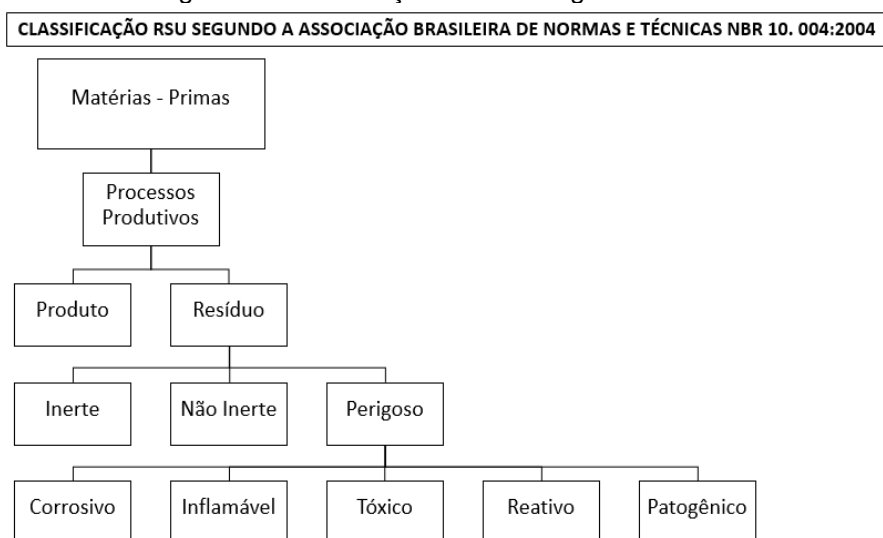
Outro critério de classificação dessa norma, consiste em:

- a) Resíduo Reciclável: papel, plástico, metal, alumínio, vidro, etc.
- b) Resíduo Não Reciclável” ou “Rejeito”: resíduos que não são recicláveis, ou resíduos recicláveis contaminados.

Outros métodos analíticos, consagrados em nível internacional, podem ser exigidos pelo Órgão de Controle Ambiental, dependendo do tipo e complexidade do resíduo, com a finalidade de estabelecer seu potencial de risco à saúde humana e ao meio ambiente.

Ainda segundo os efeitos dessa norma, os resíduos possuem apenas outra metodologia quanto a classificação, de acordo com a Figura 8.

Figura 8 - Classificação de RSU segundo a ABNT



Fonte: Adaptado de Oliveira (2015).

O Conselho Nacional de Meio Ambiente - (CONAMA), através da Resolução 005/93, define que os resíduos sólidos podem ser classificados nos grupos apresentados no Quadro 2:

Quadro 2 - Classificação dos resíduos sólidos de acordo com o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente).

<b>GRUPO</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
Grupo A	Resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido à presença de agentes biológicos;
Grupo B	Resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido suas características químicas;
Grupo C	Resíduos radioativos;
Grupo D	Resíduos comuns, que são todos os demais que não se enquadram nos grupos descritos anteriormente.

Fonte: Adaptado de Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), 2011.

Já a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), no seu Art. 13º, classifica os resíduos sólidos quando a origem, como conforme apresentado no Quadro 3, e quanto a sua periculosidade, no Quadro 4.

Quadro 3 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

<b>ORIGEM</b>	<b>ATIVIDADES</b>
a) resíduos domiciliares:	atividades domésticas em residências urbanas;
b) resíduos de limpeza urbana:	varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
c) resíduos sólidos urbanos:	os englobados nas alíneas “a” e “b”;
d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços:	os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico:	os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
f) resíduos industriais:	processos produtivos e instalações industriais;
g) resíduos de serviços de saúde:	serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
h) resíduos da construção civil:	construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
i) resíduos agropecuários e silvopastoris:	atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os

<b>ORIGEM</b>	<b>ATIVIDADES</b>
	relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
j) resíduos de serviços de transportes:	portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
k) resíduos de mineração:	atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Fonte: Adaptado da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), 2012.

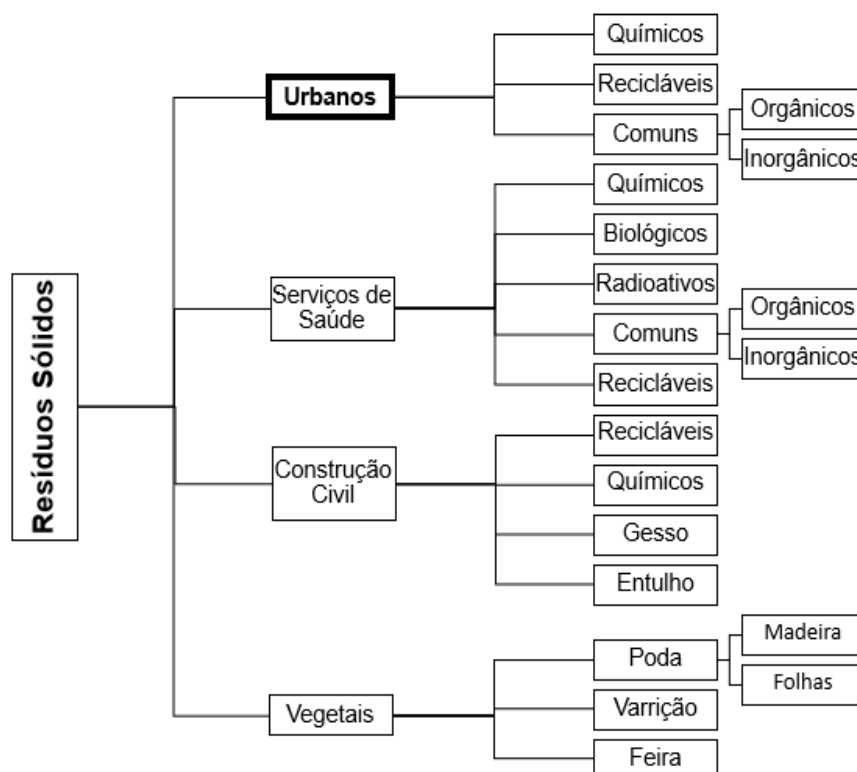
Quadro 4 - Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade, de acordo com a Política Nacional de Resíduos sólidos (PNRS).

<b>PERICULOSIDADE</b>	<b>ORIGEM</b>
a) resíduos perigosos:	aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
b) resíduos não perigosos:	aqueles não enquadrados na alínea "a".

Fonte: Adaptado da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), 2012.

Ainda de acordo com as diretrizes estabelecidas pela PNRS, há a divisão de classes residuais, sendo divididas entre resíduos urbanos, serviço de saúde, construção civil e vegetal. Cada classe, possui suas próprias características, quanto a sua composição e constituição, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Classes de Resíduos Sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor com base na PNRS.

Dessa forma, segundo a PNRS instituída em 2010, relativo à origem dos resíduos, os domiciliares são aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas, enquanto que os de limpeza urbana, são oriundos da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana, os resíduos sólidos urbanos, engloba os domésticos, assim como os de limpeza urbana. Em relação aos resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, são provenientes das atividades dessa ação, com a exceção dos resíduos de limpeza urbana, serviços públicos de saneamento básico, os de serviço de saúde/ transporte e de construção civil.

No que concerne aos resíduos da construção civil, são aqueles oriundos das construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis. Os agrossilvopastoris, são propiciados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades. Em relação aos resíduos de serviços de transportes, são aqueles originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira.

Destaca-se ainda, os resíduos de mineração, provenientes da atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

O modelo socioeconômico dominante contribui para a produção e consumo excessivo, e incentiva a criação de produtos e bens de consumo cada vez menos duráveis e descartáveis para que se reduza custo de produção e para que o bem ou produto possa ser consumido universalmente. A geração de resíduos sólidos urbanos está intimamente ligada a esse modelo que gera desperdício em todas as suas etapas, desde a concepção dos produtos, desperdício em sua utilização e por fim seu descarte inadequado, gerando danos ambientais. (ZANETI, 2003).

#### **2.1.4 Panorama da disposição dos resíduos sólidos no Brasil segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos.**

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos contempla a problemática dos diversos tipos de resíduos gerados, as alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, planos de metas, programas, projetos e ações correspondentes. O

documento, foi elaborado sob a coordenação do Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Após várias discussões documento finalizou com 29 diretrizes, 170 estratégias e 28 metas, e incorporou as contribuições cabíveis e pertinentes dos processos de consulta pública e audiências públicas regionais e nacional, tanto de setores especializados (prestadores privados de serviços, academia, empresas privadas que atuam na área), quanto do setor público e da sociedade em geral.

Por meio da Tabela 1 tem-se a composição dos resíduos mais encontrados no Brasil no ano de 2008 e sua quantidade, expressa em toneladas por dia.

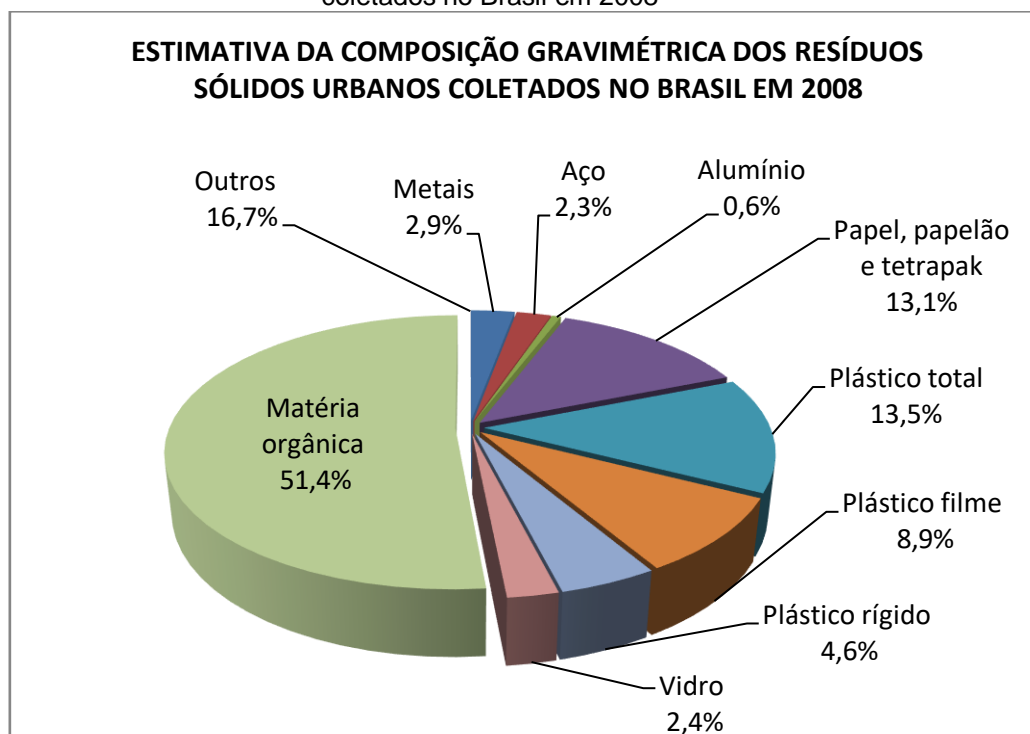
Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008

<b>RESÍDUOS</b>	<b>(%)</b>	<b>QUANTIDADE (t/dia)</b>
Material reciclável	31,9	58.527,40
Metais	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão e tetrapak	13,1	23.997,40
Plástico total	13,5	24.847,90
Plástico filme	8,9	16.399,60
Plástico rígido	4,6	8.448,30
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>183.481,50</b>

Fonte: Adaptado pelo autor do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, a partir de IBGE (2010b) e artigos diversos, 2012.

Verifica-se um alto percentual de material reciclável, ou seja 31,9%, mas um percentual chama a atenção, 51,4% de matéria orgânica, portanto acima da metade do total coletado, e que consiste em matéria prima para os processos de compostagem. Por meio destes valores, apresentados no Gráfico 1, já se justifica a necessidade de novas pesquisas voltadas para o desenvolvimento de processos mais eficientes de compostagem.

Gráfico 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Na Tabela 2 está apresentada uma estimativa da distribuição dos resíduos coletados através das regiões políticas brasileiras, bem como uma média da quantidade de resíduos gerados por habitante diariamente.

Tabela 2 - Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e públicos coletados no Brasil em 2000 e 2008

Unidade de análise	Quantidade de resíduos coletados (t/dia)		Quantidade de resíduos por habitante urbano (kg/hab.dia)	
	2000	2008	2000	2008
Brasil	149.094,30	183.481,50	1,1	1,1
Norte	10.991,40	14.637,30	1,2	1,3
Nordeste	37.507,40	47.203,80	1,1	1,2
Sudeste	74.094,00	68.179,10	1,1	0,9
Sul	18.006,20	37.342,10	0,9	1,6
Centro-Oeste	8.495,30	16.119,20	0,8	1,3

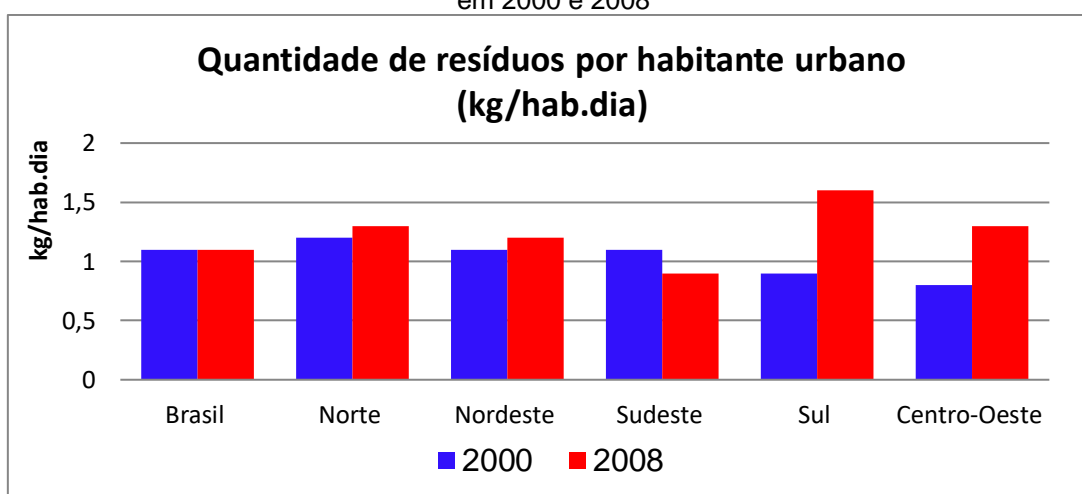
Fonte: Adaptado pelo autor do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Conforme Plano Nacional de Resíduos Sólidos, com relação à coleta seletiva de materiais recicláveis, entre 2000 e 2008 houve um aumento de 120% no número de municípios que desenvolvem tais programas, que chegaram a 994, estando a maioria localizada nas regiões Sul e Sudeste. Esse marco, embora importante,

ainda não ultrapassa 18% dos municípios brasileiros. Todavia a análise da quantidade de material recuperado por tais programas indica a necessidade de seu aprofundamento.

Nota-se que a região sudeste, apesar de ser a maior produtora de resíduos sólidos, quando se analisa a produção de resíduos por habitante/dia, é a única região que apresentava uma queda de geração de 1,1 kg/hab.dia para 0,9 kg/hab.dia, queda esta que não apresenta motivo de discussão do referido relatório. O Gráfico 2 evidencia estas estimativas de geração de resíduos sólidos:

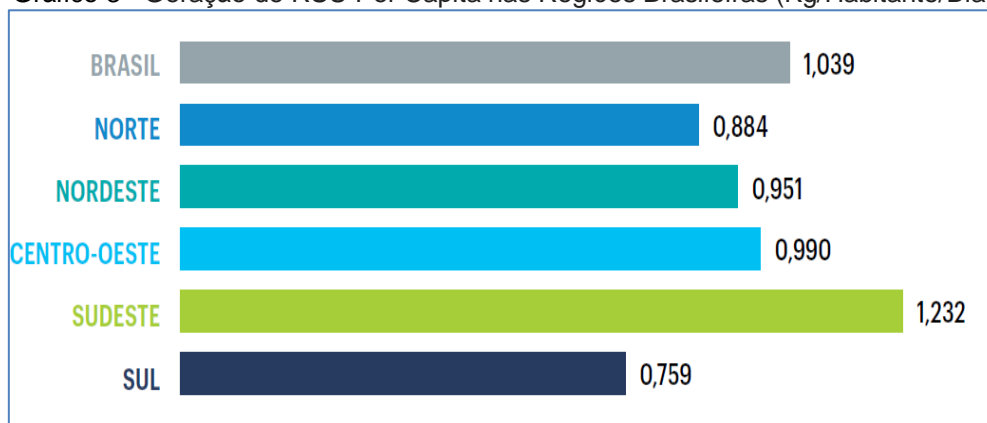
Gráfico 2 - Estimativa da quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil por habitante/dia em 2000 e 2008



Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Porém, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2019 a região sudeste, diferentemente das demais regiões, produziu resíduos em proporção maior que sua participação na população brasileira: concentra 42% dos habitantes, mas gera 50% dos RSU, com um índice per capita de 1,23 kg/habitante/dia (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Geração de RSU Per Capita nas Regiões Brasileiras (Kg/Habitante/Dia)



Fonte: ABRELPE, 2019.

As estimativas indicam que a participação dos resíduos recuperados pelos programas de coleta seletiva formais ainda é muito pequena, o que sugere que a reciclagem no país ainda é mantida pela reciclagem pré-consumo e pela coleta pós-consumo informal, que devem ser objeto de estudos específicos.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos indica ainda que, quanto a destinação dos resíduos sólidos urbanos, tanto em 2000 quanto em 2008 observa-se que, mais de 90%, em massa, dos resíduos são destinados para a disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo somente os 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas alagadas e outros destinos, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, nos anos de 2000 e 2008

Destino Final	2000		2008	
	Quantidade (t/d)	%	Quantidade (t/d)	%
<b>Aterro sanitário</b>	<b>49.614,50</b>	<b>35,4</b>	<b>110.044,40</b>	<b>58,3</b>
<b>Aterro Controlado</b>	<b>33.854,30</b>	<b>24,2</b>	<b>36.673,20</b>	<b>19,4</b>
<b>Vazadouros a céu aberto (Lixão)</b>	<b>45.484,70</b>	<b>32,5</b>	<b>37.360,80</b>	<b>19,8</b>
<b>Unidade de compostagem</b>	<b>6.364,50</b>	<b>4,5</b>	<b>1.519,50</b>	<b>0,8</b>
<b>Unidade de triagem para reciclagem</b>	<b>2.158,10</b>	<b>1,5</b>	<b>2.592,00</b>	<b>1,4</b>
<b>Unidade de incineração</b>	<b>483,10</b>	<b>0,3</b>	<b>64,80</b>	<b>&lt;0,1</b>
<b>Vazadouro em áreas alagáveis</b>	<b>228,10</b>	<b>0,2</b>	<b>35,00</b>	<b>&lt;0,1</b>
<b>Locais não fixos</b>	<b>877,30</b>	<b>0,6</b>	<b>SI</b>	
<b>Outra unidade</b>	<b>1.015,10</b>	<b>0,7</b>	<b>525,20</b>	<b>0,3</b>
<b>TOTAL</b>	<b>140.080,70</b>		<b>188.814,90</b>	

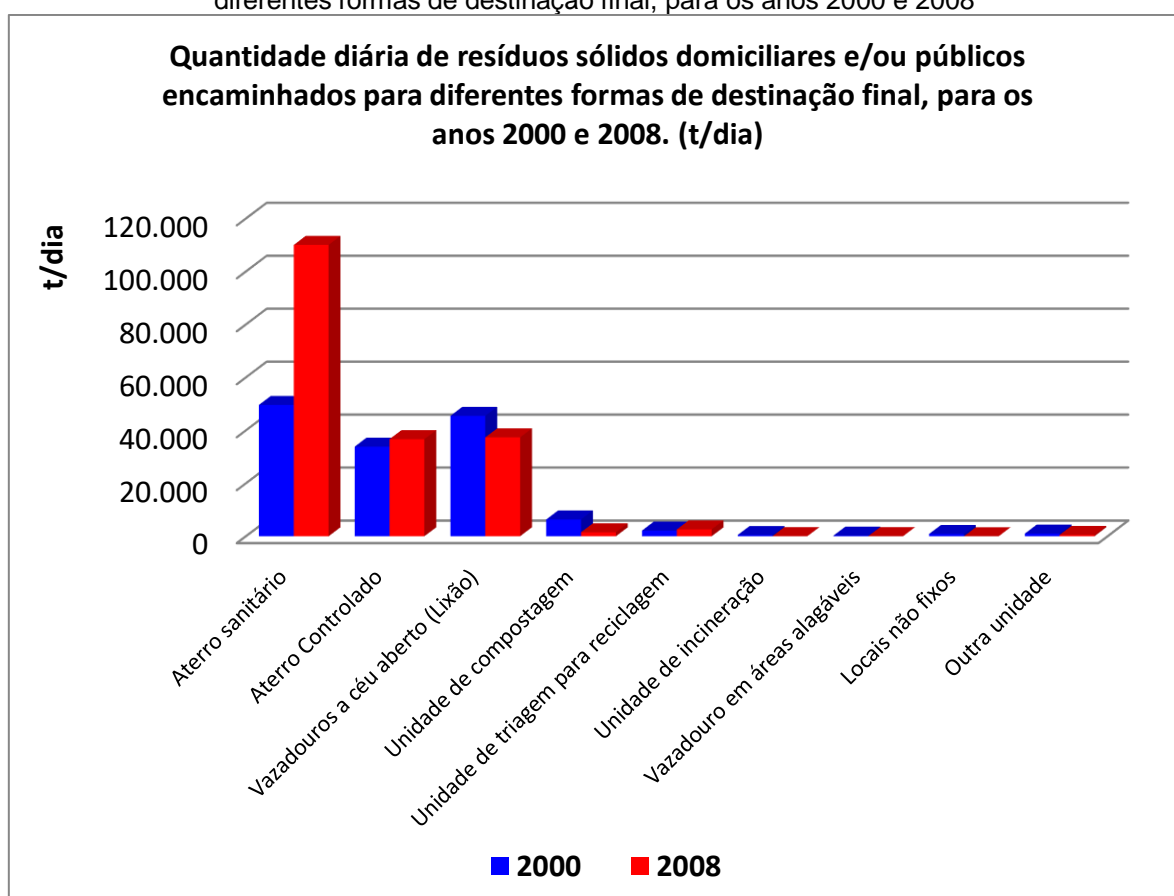
Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, (2012).

No quesito tratamento, apesar da massa de resíduos sólidos urbanos apresentar alto percentual de matéria orgânica, as experiências de compostagem, no Brasil, são ainda incipientes. O resíduo orgânico, por não ser coletado separadamente, acaba sendo encaminhado para disposição final, juntamente com os resíduos domiciliares. Essa forma de destinação gera, para a maioria dos municípios, despesas que poderiam ser evitadas caso a matéria orgânica fosse

separada na fonte e encaminhada para um tratamento específico, por exemplo, via compostagem.

Observa-se que a destinação para unidade de compostagem, que correspondia em 2000 a 4,5% como destinação final, do total de toneladas/dia, decresceu em 2008 para apenas 0,8% desta destinação, demonstrando uma diminuição significativa desta forma de tratamento dos resíduos orgânicos, não sendo encontrados motivos que justifiquem esta queda. Estes dados podem ser melhor observados através do Gráfico 4.

Gráfico 4 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008



Fonte: Adaptado pelo autor do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Do total estimado de resíduos orgânicos que são coletados (94.335,10 t/d) somente 1,6% (1.509 t/d) é encaminhado para tratamento via compostagem. Em termos absolutos tem-se 211 municípios brasileiros com unidades de compostagem, sendo que os Estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul possuem a maior concentração, 78 e 66 unidades respectivamente.

Quanto à disposição final de resíduos e rejeitos no solo, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012), foram classificadas a partir de três principais

formas - aterro sanitário, aterro controlado e lixão, sendo importante caracterizarmos cada um deles:

I - Lixão - forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, que consiste na descarga do material no solo sem qualquer técnica ou medida de controle.

Diversos problemas tornam o lixão a solução menos indicada quando o assunto é o descarte do lixo. Por não ter nenhum tipo de proteção, esses locais se tornam vulneráveis à poluição causada pela decomposição do lixo, tanto no solo, quanto nos lençóis freáticos e no ar.

Isso ocorre porque a maior parte do material despejado entra em processo de decomposição, produzindo o chorume e o gás metano. O chorume escorre com o auxílio da chuva e penetra na terra, chegando aos lençóis freáticos localizados abaixo do lixão e contaminando a água.

Já o biogás resultante da decomposição do lixo é formado por gases como metano, gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e vapor d'água, é liberado diretamente para a atmosfera - sem antes passar por nenhum tipo de tratamento.

Além dos impactos ambientais, o acúmulo de lixo atrai animais transmissores de doenças, como moscas e ratos. O local ainda é tido como fonte de renda para a população carente, que recolhe o material reciclável e, em alguns casos, chega a se alimentar dos restos encontrados no lixo (Figura 10).

Figura 10 - Forma inadequada de disposição de resíduos e rejeitos no solo: Lixão



II - Aterro controlado - forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, no qual o único cuidado realizado é o recobrimento da massa de resíduos e rejeitos com terra. Os aterros controlados são locais com características técnicas intermediárias entre o lixão e o aterro sanitário. Trata-se geralmente de antigas células que foram remediadas e passaram a reduzir os impactos ambientais e a gerenciar o recebimento de novos resíduos.

Esses locais recebem cobertura de argila e grama e fazem a captação dos gases e do chorume. O biogás é capturado e queimado e parte do chorume é recolhido. Os aterros controlados são cobertos com terra ou saibro diariamente, fazendo com que o lixo não fique exposto e não atraia animais (Figura 11).

Figura 11 - Disposição de resíduos sólidos em aterro controlado



Fonte: <http://www.montesclaros.mg.gov.br>.

III - Aterro sanitário - Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança minimizando os impactos ambientais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos apresenta este método utilizando os princípios de engenharia (impermeabilização do solo, cercamento, ausência de catadores, sistema de drenagem de gases, águas pluviais e lixiviado) para confinar os resíduos e rejeitos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-o com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

As células são impermeabilizadas com mantas de PVC e o chorume é drenado e depositado em um poço, para tratamento futuro. O biogás é drenado e pode ser queimado ou aproveitado para eletricidade. Por ser coberto por terra diariamente não há proliferação de pragas urbanas. Esses locais são planejados para captar e tratar os gases e líquidos resultantes do processo de decomposição, protegendo o solo, os lençóis freáticos e o ar (Figura 12).

Figura 12 - Aterro sanitário: Destinação de resíduos sólidos sem impacto ambiental

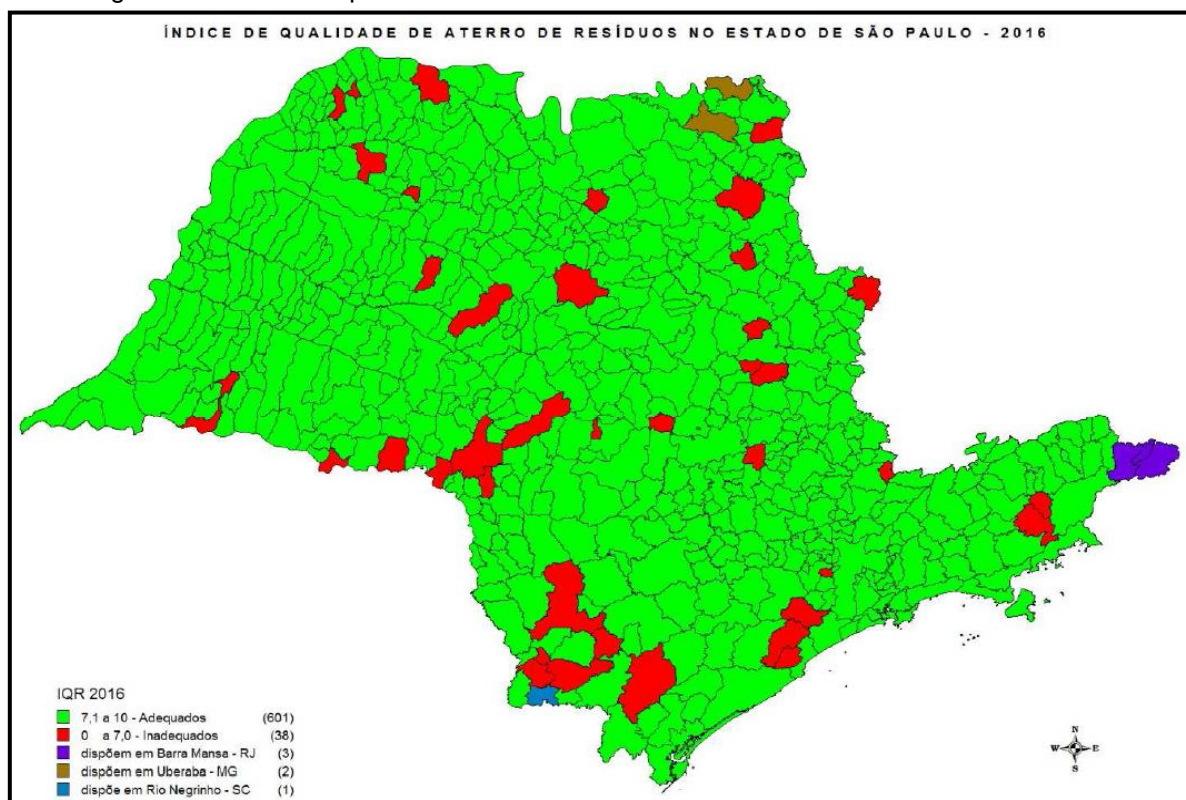


Fonte: <http://6omeganacional.blogspot.com.br>

No Estado de São Paulo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), apresentou o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares de 2016, refletindo as condições dos sistemas de disposição e tratamento de resíduos domiciliares, após a consolidação de dados e informações coletados em 2016, em cada um dos 645 municípios do Estado.

Estas condições são expressas pelos Índices de Qualidade de Aterro de Resíduos - IQR, de Qualidade de Aterros em Valas - IQR Valas e de Qualidade de Usinas de Compostagem IQC, que apresentam variação de 0 a 10 e são classificados em três faixas de enquadramento: inadequada, controlada e adequada (Figura 13).

Figura 13 - Índice de qualidade de aterro de resíduos no Estado de São Paulo em 2016



Fonte: Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), 2016.

Por meio da Tabela 4 é possível observar que em termos quantitativos, de 2000 a 2008, houve um aumento de 120% na quantidade de resíduos e rejeitos dispostos em aterros sanitários e uma redução de 18% na quantidade encaminhada para lixões.

Diferentemente do que ocorria em 2000, quando 60% da quantidade total dos resíduos e rejeitos urbanos eram dispostos de forma inadequada (aterro controlado e lixão), em 2008, vê-se a inversão desses valores, no qual 60% têm disposição final em aterro sanitário, sem se esquecer que ainda há 74 mil toneladas por dia de resíduos e rejeitos sendo dispostos em aterros controlados e lixões.

Tabela 4 - Quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição em solo, considerando somente lixão, aterro controlado e aterro sanitário (t/dia)

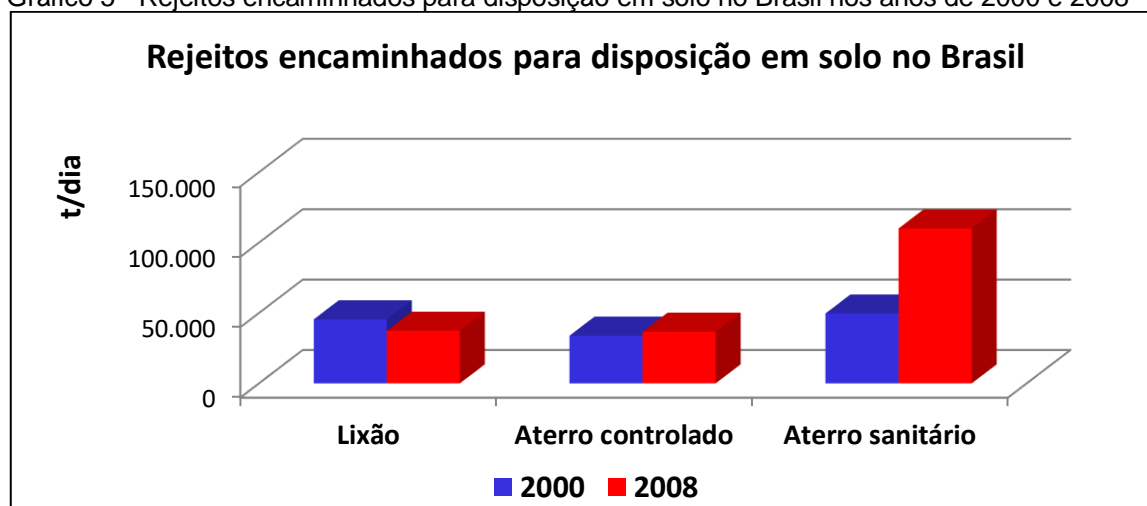
Unidade de análise	Lixão		Aterro controlado		Aterro sanitário	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008
PNSB	45.484,70	37.360,80	33.854,3	36.673,20	49.614,5	110.044,40
<b>Estrato Populacional</b>						
Municípios pequenos	34.533,10	32.504,30	10.405,90	14.067,90	6.878,40	32.420,50

Unidade de análise	Lixão		Aterro controlado		Aterro sanitário	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008
PNSB	2000	2008	2000	2008	2000	2008
Municípios médios	10.119,60	4.844,50	15.525,50	17.278,30	17.105,80	45.203,40
Municípios grandes	832,00	12,00	7.922,90	5.327,00	25.630,30	32.420,50
Macrorregião						
Norte	6.148,50	4.892,50	3.221,8	4.688,20	1.350,2	4.540,60
Nordeste	20.579,60	23.461,50	6.113,1	6.819,00	6.714,9	25.246,60
Sudeste	11.521,00	3.636,20	15.685,6	16.767,00	32.568,4	61.576,80
Sul	4.645,80	1.432,80	4.698,8	3.485,00	5.882,1	15.293,10
Centro-Oeste	2.589,80	3.937,80	4.135,0	4.914,00	3.098,9	3.387,30

Fonte: Adaptado pelo autor do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Em termos absolutos, todas as regiões apresentaram aumento na quantidade total de resíduos e rejeitos dispostos em aterros sanitários. Analisando os resultados de disposição em aterros sanitários considerando o total disposto observa-se que a região Sul apresentou melhor desempenho em 2008, dispondo mais de 75% dos seus resíduos sólidos coletados em aterros sanitários (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Rejeitos encaminhados para disposição em solo no Brasil nos anos de 2000 e 2008



Fonte: Adaptado pelo autor do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Analisando a situação da disposição final pelo viés do número de unidades de disposição final nos municípios com presença de aterros sanitários, de aterros controlados e de lixões observou-se que, em 2000, 86% dos municípios encaminhavam seus resíduos e rejeitos para aterros controlados e lixões e, somente

14% dos municípios tinham aterros sanitários. Em 2008, apesar do aumento ocorrido no número de municípios (29%) que fazem a disposição final em aterros sanitários vê-se que a maioria deles (71%) ainda dispõe seus resíduos e rejeitos em aterros controlados e lixões.

Diante deste panorama apresentado pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, observa-se a necessidade de se encontrar soluções imediatas para a disposição dos resíduos sólidos urbanos, pois ao voltar-se para a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), verifica-se que os três principais pontos que ainda em 2020 não foram contemplados:

I - Prazo para que até 2014 não mais existam lixões a céu aberto no Brasil. No lugar deles, devem ser criados aterros controlados ou aterros sanitários. Os aterros têm preparo no solo para evitar a contaminação de lençol freático, captam o chorume que resulta da degradação do lixo e contam com a queima do metano para gerar energia;

II - Somente os rejeitos poderão ser encaminhados aos aterros sanitários, compreendendo-se como rejeitos aquela parte do resíduo que não tem como ser reciclado. Apenas 10% dos resíduos sólidos são rejeitos. A maioria é orgânica, que em compostagens pode ser reaproveitada e transformada em adubo, e reciclável, que deve ser devidamente separada para a coleta seletiva;

III - Elaboração de planos de resíduos sólidos nos municípios, sendo elaborados para direcionar prefeitos e cidadãos a descartar de forma correta o lixo.

O reaproveitamento da matéria orgânica composta para recomposição do solo, pois é rico em nutrientes como o fósforo, essencial para a produção de alimentos e que segundo pesquisadores, possui uma previsibilidade de acabar a sua extração no prazo de 25 a 50 anos.

#### **2.1.5 Panorama da disposição dos resíduos sólidos no Brasil segundo o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos - SINIR**

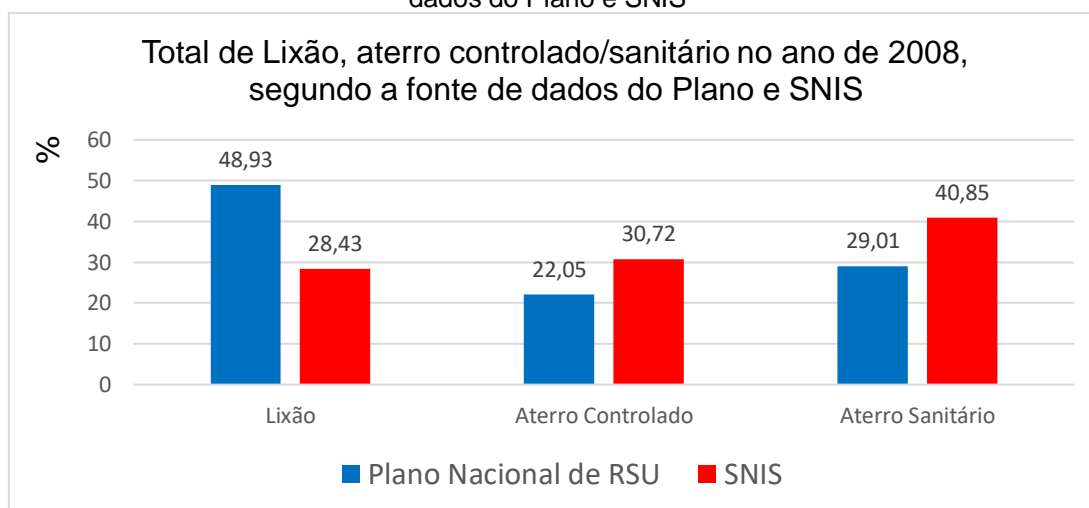
O Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos - SINIR é um dos Instrumentos da PNRS, que está basicamente vinculada neste

Sistema de Informações e a evolução de sua concepção envolverá o Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente (SINIMA) e o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento Básico (SINISA), atual SNIS que é coordenado pelo Ministério das Cidades.

Analisando-se os dados apresentados no SINIR, pode-se atualizar o panorama dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Assim foram verificados dados relatados em tabelas e elucidados em gráficos, sendo utilizado o histórico de indicadores coletados dos anos de 2004 a 2016.

Ainda que se tenha a deferência quanto ao assunto, nota-se a divergência quanto aos dados coletados sobre o total de lixão, aterro controlado e sanitário no ano de 2008, segundo duas fontes de dados: Plano Nacional de Resíduos Sólidos e o SNIS, conforme exposto no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Total de Lixão, aterro controlado/sanitário no ano de 2008, segundo a fonte de dados do Plano e SNIS



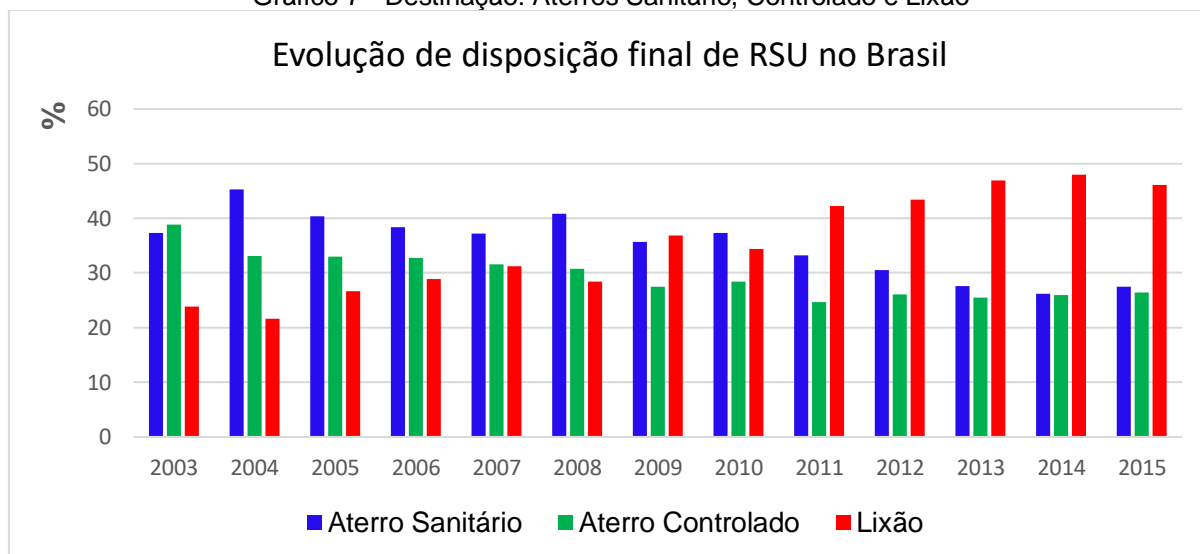
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o Gráfico 12, surgem dúvidas quanto a confiabilidade da coleta de dados discutidas, uma vez que para o mesmo ano, tem-se significativamente a disparidade e ambiguidade de valores, sendo que a diferença consiste em 20,5 % para os registros quanto ao lixão, 8,67% para os aterros controlados e 11,84% para os valores quanto a existência de aterros sanitários.

Um fator a ser ponderado, de acordo com o Gráfico 13, consiste no aumento gradativo de lixões e a constância entre aterros controlados e sanitários. A meta para construção de aterros sanitários, segundo a PNRS, consistia em 2014. Contudo, de acordo com Gráfico 7, ocorre o oposto da meta estabelecida, ou seja;

diminuição do número de aterros, tanto controlado, quanto sanitário, e o aumento de lixões.

Gráfico 7 - Destinação: Aterros Sanitário, Controlado e Lixão



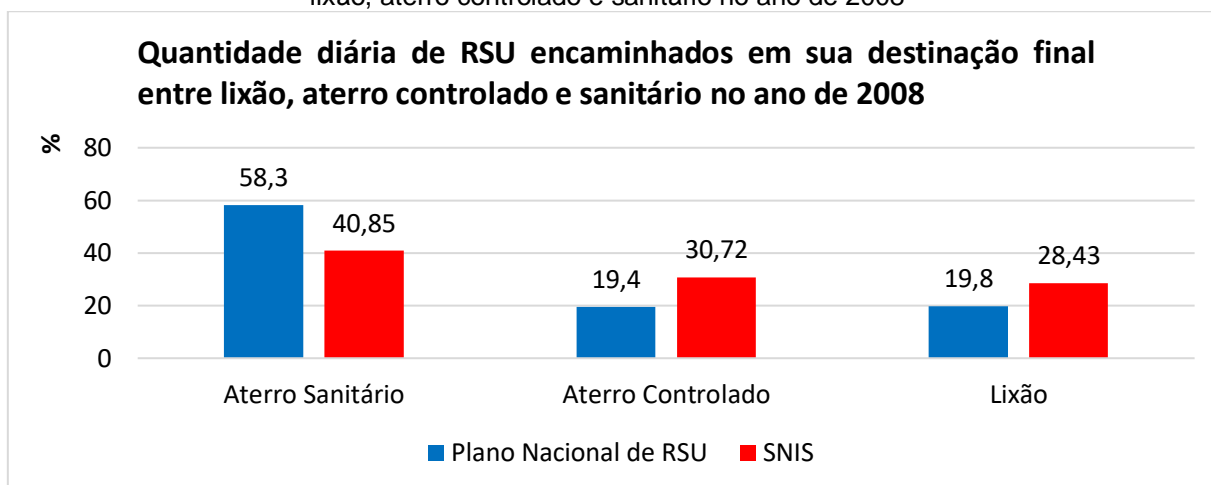
Fonte: Elaborado pelo autor.

A evidência do aumento de controle de RSU pode ser destacada devido a cobrança imposta pela PNRS após a sua implementação, uma vez que o número de aterros tanto controlados, quanto sanitários aumentou a partir do ano de 2011. Outro fator que pode contribuir com o aumento desses números, consiste na meta proposta ainda pela PNRS quando foi implementada em 2010, de destinar os RSU em aterros sanitários, até ano de 2014.

É fundamental ressaltar que a população brasileira não dobrou entre 2002 a 2015, logo; o aumento do volume de RSU também pode estar relacionado não somente ao consumo e regalias tecnológicas, mas ao próprio controle de informações que não eram registrados nos anos sucessores a implementação da PNRS. Há também, o fator da crescente taxa de produção e consumo de produtos que associada ao aumento da geração de resíduos, e ainda; junto do acelerado processo de urbanização, ocasiona a existência de grandes concentrações demográficas, e conseqüente e inevitavelmente; promove a geração de RSU.

Arelado a esse fator de geração residual, um aspecto que se torna visível, consiste nos dados referentes a quantidade diária de RSU que se é encaminhada para lixão, aterros controlados e sanitários, conforme ilustrado no Gráfico 8, tomando por base a divulgação de dados datados do ano de 2008, uma vez mais é eminente a disparidade entre os valores expostos segundo o Plano e os registrados de acordo com o banco de dados SNIS.

Gráfico 8 - Quantidade diária de RSU encaminhados em sua destinação final entre lixão, aterro controlado e sanitário no ano de 2008

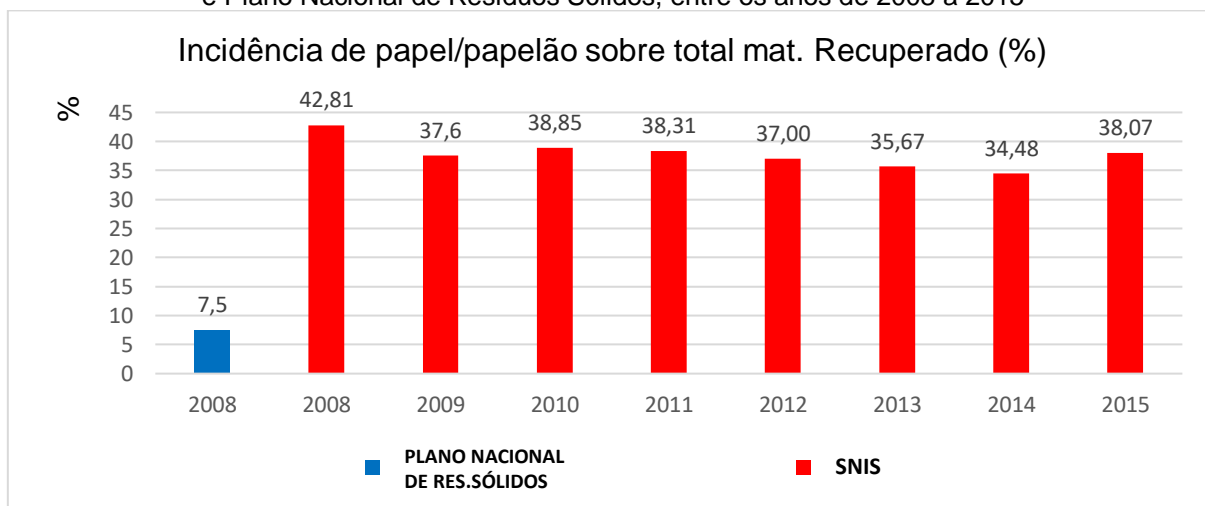


Fonte: Elaborado pelo autor.

Tantas discrepâncias de valores a respeito do mesmo conteúdo, nos mostra a necessidade de se investir em uma coleta de dados mais eficiente. Quando se explana a respeito de RSU, há ainda, um outro aspecto a ser analisado; a incidência por tipo de resíduos, sendo: metais, papel/papelão, plástico, vidro e ainda, a categoria “outros” (roupas, óleos de cozinha e de motor, resíduos provenientes da informática).

De acordo com o Gráfico 9, com o processo do passar dos anos, existem contrastes quanto a cada categoria em questão.

Gráfico 9 - Incidência de papel/papelão sobre total de material recuperado baseados em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, entre os anos de 2008 a 2015

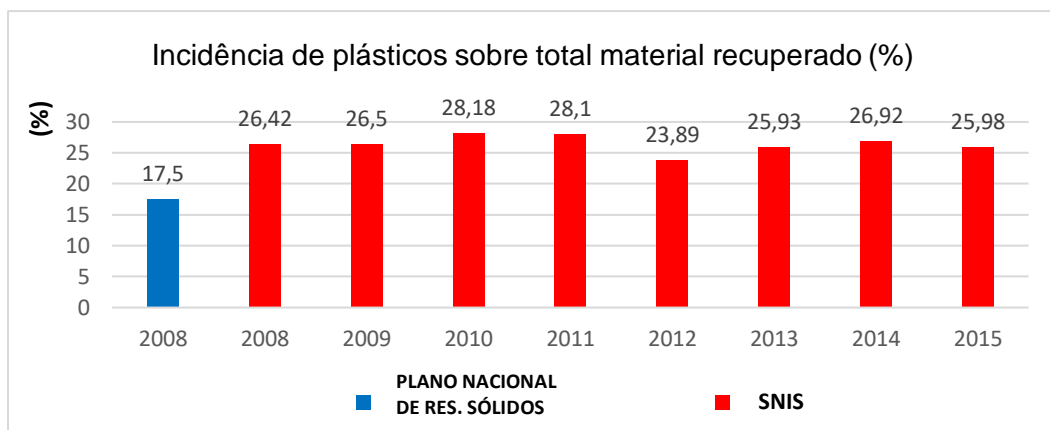


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores aqui obtidos, como expostos no gráfico, são oriundos do Plano e do SNIS. É possível realizar a comparação expondo uma divergência de valores para o ano de 2008, registrando um valor extremamente baixo para a referência

contida no Plano e no SNIS, diferença essa, de 42,11 %. Quando analisamos os dados a partir do ano de 2009 até 2015, segundo a fonte SNIS, notamos que há uma padronização dos valores. O Plano não registrou coleta de dados referente a esses anos, como feito pelo SNIS. No Gráfico 10, são expostos os valores quanto a incidência de plásticos.

Gráfico 10 - Incidência de plásticos sobre total de material recuperado baseados em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos. Sólidos entre os anos de 2008 a 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez mais, é possível notar o grande contraste de valores quanto aos registros da mesma informação, porém; duas referências distintas. No ano de 2008, o Plano expõe um valor 18,92% menor do que o número mostrado pelo SNIS. Novamente, ao decorrer dos anos entre 2009 a 2015, há uma constância nos resultados apresentados pelo SNIS.

De acordo com o Gráfico 11, o oposto ocorre para a categoria de metais, e o SNIS apresenta valores inferiores aos anunciados pelo Plano.

Gráfico 11 - Incidência de metais sobre total de material recuperado, baseado em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, entre os anos de 2008 a 2015

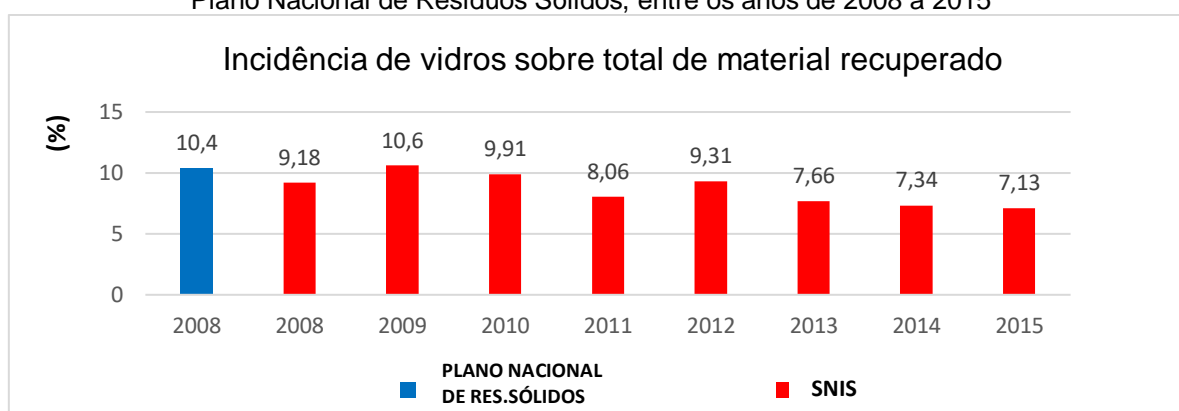


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em 2008, a incidência de metais sobre o total de material recuperado, segundo os dados do Plano, foi de 4,71% superior aos dados demonstrados pelo SNIS. Contudo, o SNIS continuou a apresentar estabilidade de valores durante os anos seguintes, entre 2009 a 2015.

A maior disparidade de valores obtidos durante esse período, foi registrado entre 2010 e 2014, obtendo um valor de 3,52% de diferença, tendo assim, aumentado a incidência quanto a classe de metais no Brasil. Conforme exposto pelo Gráfico 12, também há a categoria quanto a incidência de vidros.

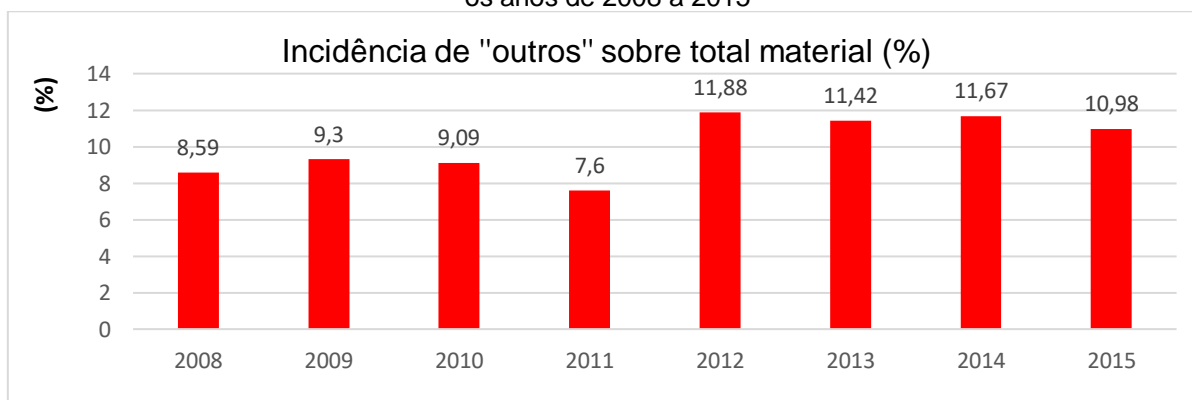
Gráfico 12 - Incidência de vidros sobre total de material recuperado baseado em dados SNIS e Plano Nacional de Resíduos Sólidos, entre os anos de 2008 a 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação a incidência de vidros, os dados do Plano se mostram apenas 1,22 % superiores aos dados expostos pelo SNIS. Para os valores do intervalo entre os anos de 2009 a 2012, os dados do SNIS continuam a mostrar um padrão em seus valores, registrando uma maior distinção entre os anos de 2013 a 2015. Ainda, o Gráfico 13 nos mostra as informações quanto a categoria “outros”, (roupas, óleos de cozinha e de motor, resíduos provenientes da informática).

Gráfico 13 - Incidência de “outros” sobre total de material recuperado baseado em dados SNIS entre os anos de 2008 a 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados em questão, foram somente registrados pelo SNIS, assim sendo, o Plano não apresentou informações a respeito dessa classe de resíduos contidos na classificação de RSU.

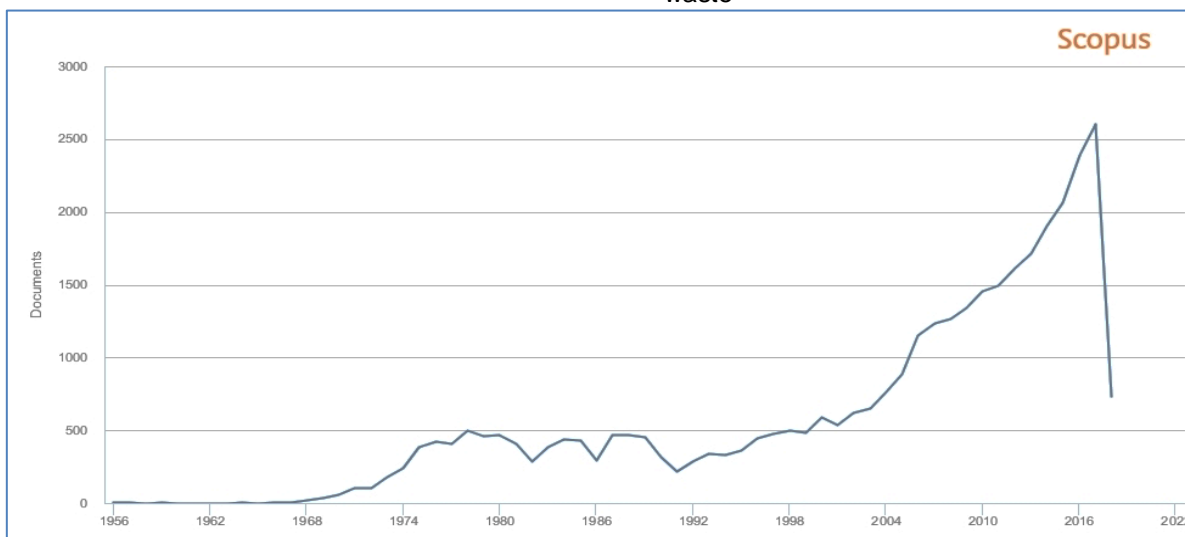
O menor ano de incidência de “outros”, está registrado no ano de 2011, mostrando que esse valor pode ter sido inferior devido a implementação e possível cumprimento das diretrizes da PNRS já previamente apresentadas no Plano divulgada em 2010.

### 2.1.6 Revisão Bibliométrica

Foi pesquisada neste eixo, a palavra-chave no idioma inglês “*solid waste*”, ou seja, resíduos sólidos, utilizando-se como campo de pesquisa “*Article title*” (título do artigo), “*Abstract*” (resumo) e “*Keywords*” (palavra-chave), selecionando-se apenas os documentos que foram intitulados de “*Article*” (artigo) sendo encontrados um total de 35.746 artigos que atingiram estes argumentos.

Os documentos foram publicados no período de 1956 a 2018, distribuídos ao longo da linha do tempo conforme o Gráfico 14.

Gráfico 14 - Quantidade de artigos publicados de 1956 a 2018 utilizando o termo de pesquisa "solid waste"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Verifica-se um aumento expressivo a partir do ano de 2006, com 1.153 artigos publicados. Os vinte trabalhos com mais citações, que atenderam as palavras-chave de busca, são apresentados no Quadro 5:

Quadro 5 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo "solid waste"

	<b>Título do Trabalho</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Ano de Public.</b>	<b>Periódico</b>	<b>Cit.</b>
1	Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste	Namasivayam, C., Kavitha, D.	2002	Dyes and Pigments Volume 54, Edição 1, Julho de 2002, Páginas 47-58	904
2	Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals	Demirbaş, A.	2001	Energy Conversion and Management Volume 42, Edição 11, Julio de 2001, Páginas 1357-1378	836
3	Single- and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse - An agricultural waste	Mohan, D., Singh, K.P.	2002	Water Research Volume 36, Edição 9, Maio de 2002, Páginas 2304-2318	754
4	Sewage sludge combustion	Werther, J., Ogada, T.	1999	Progress in Energy and Combustion Science Volume 25, Edição 1, Fevereiro de 1999, Páginas 55-116	720
5	Combustion characteristics of different biomass fuels	Demirbas, A.	2004	Progress in Energy and Combustion Science Volume 30, Edição 2, 2004, Páginas 219-230	679
6	Chlorodibenzo-p-dioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in The Netherlands	Olie, K., Vermeulen, P.L., Hutzinger, O.	1977	Chemosphere Volume 6, Edição 8, 1977, Páginas 455-459	670
7	Evaluating toxicity of immature compost	Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoldi, M.	1981	BioCycle Volume 22 Edição 2 Páginas 54-57	658
8	Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays	Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., (...), Jenicek, P., Van Lier, J.B.	2009	Water Science and Technology Volume 59 Edição 5, Páginas 927-934	626
9	Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water	Heberer, T.	2002	Journal of Hydrology Volume 266, Edições 3-4, 15 de setembro de 2002, páginas 175-189	611
10	Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste	Lay, J.-J., Lee, Y.-J., Noike, T.	1999	Water Research Volume 33, Edição 11, Agosto 1999, Páginas 2579-2586	553
11	Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics	Srivastava, V.C., Swamy, M.M., Mall, I.D., Prasad, B., Mishra, I.M.	2006	Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects Volume 272, Edições 1-2, 5 de janeiro de 2006, páginas 89-104	549
12	Solid-state fermentation	Pandey, A.	2003	Biochemical Engineering Journal Volume 13, Edições 2-3, março de 2003, páginas 81-84	540
13	Plastic waste inputs from land into the ocean	Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., (...), Narayan, R., Law, K.L.	2015	Science Volume 347, Edição 6223, páginas 768-771	538
	<b>Título do Trabalho</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Ano de Public.</b>	<b>Periódico</b>	<b>Cit.</b>

14	Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: A pilot study	Huber, M.M., Göbel, A., Joss, A., (...), Ternes, T.A., Von Gunten, U.	2005	Environmental Science and Technology Volume 39, Edição 11, páginas 4290-4299	486
15	The changing metabolism of cities	Kennedy, C., Cuddihy, J., Engel-Yan, J.	2007	Journal of Industrial Ecology Volume 11, Edição 2, Páginas 43-59	452
16	Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment	Nakada, N., Tanishima, T., Shinohara, H., Kiri, K., Takada, H.	2006	Water Research Volume 40, Edição 17, Outubro de 2006, Páginas 3297-3303	441
17	Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion	Zhang, R., El-Mashad, H.M., Hartman, K., (...), Choate, C., Gamble, P.	2007	Bioresource Technology Volume 98, Edição 4, Março de 2007, Páginas 929-935	439
18	Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: Review	McKay, G.	2002	Chemical Engineering Journal Volume 86, Edição 3, 28 de abril de 2002, Páginas 343-368	423
19	Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash - A sugar industry waste	Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Sharma, M., Saini, V.K.	2003	Water Research Volume 37, Edição 16, Setembro de 2003, Páginas 4038-4044	406
20	The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks	Canakci, M.	2007	Bioresource Technology Volume 98, Edição 1, Janeiro de 2007, Páginas 183-190	402

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Os trabalhos mais citados sobre resíduos sólidos versam sobre as formas de contaminação das águas, do solo e do ar e também as suas formas de tratamento, buscando sempre soluções para de melhoria da qualidade vida e saúde das populações.

O trabalho com maior quantidade de citações Namasivayam e Kavitha (2002) é o resultado da pesquisa de tratamento de resíduos de efluentes, por meio da adsorção de corantes do rio Congo pelo carbono da fibra de coco, e foi realizada variando os parâmetros como tempo de agitação, concentração de corante, dose de adsorvente, pH e temperatura.

Outra pesquisa que também buscou a solução no tratamento de efluentes, analisou o uso de carvão ativado de baixo custo derivado do bagaço, um material agrícola residual, foi investigado como um substituto para os atuais métodos caros de remoção de metais pesados das águas residuais (MOHAN e SINGH, 2001) foi o terceiro trabalho mais citado na Scopus obtidos pela pesquisa do termo "solid waste".

Gupta *et al.* (2003) pesquisaram sobre a remoção de cádmio e níquel das águas residuais usando cinzas volantes de bagaço - um resíduo da indústria açucareira na Índia. A cinza volante de bagaço, um resíduo sólido industrial da indústria açucareira, foi utilizada para a remoção de cádmio e níquel das águas residuais. Até 90% de remoção de cádmio e níquel é possível em cerca de 60 e 80min, respectivamente, nas condições de teste em lote. Foi estudado o efeito de várias variáveis operacionais, pH da solução, dose de adsorvente, concentração de adsorvente, temperatura, tamanho de partícula, etc., na remoção de cádmio e níquel. A adsorção máxima de cádmio e níquel ocorreu nas concentrações de 14 e 12mg/l<sup>-1</sup> e no pH de 6,0 e 6,5, respectivamente. Uma dose de 10g/l<sup>-1</sup> de adsorvente foi suficiente para a remoção ideal de ambos os íons metálicos. O material apresentou boa capacidade de adsorção.

A remoção adsorvente de fenol por cinzas volantes de bagaço e carvão ativado: Equilíbrio, cinética e termodinâmica foi o estudado por Srivastava *et al.* (2006), onde tratou da adsorção de fenol nas cinzas volantes de bagaço ricos em carbono na classe comercial de carvão ativado e na classe de laboratório. O bagaço rico em carbono é um resíduo sólido obtido do equipamento de coleta de partículas acoplado à linha de gás de combustão das caldeiras de bagaço das usinas de açúcar de cana. Estudos em lotes foram realizados para avaliar as influências de vários parâmetros experimentais como pH inicial (pH<sub>0</sub>), tempo de contato, dose de adsorvente e concentração inicial (C<sub>0</sub>) na remoção de fenol MJ/kg, respectivamente. O alto valor negativo da mudança na energia livre de Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) indica a adsorção viável e espontânea de fenol.

Huber *et al.* (2005) estudaram a oxidação de produtos farmacêuticos durante a ozonização de efluentes municipais de águas residuais. Para reduzir a liberação de produtos farmacêuticos e desreguladores endócrinos no ambiente aquático ou removê-los das águas residuais destinadas à reutilização direta ou indireta, pode ser necessária a aplicação de tratamento avançado de águas residuais. No estudo, os efluentes municipais das águas residuais foram tratados com ozônio (O<sub>3</sub>) em uma planta em escala piloto composta por duas colunas de bolhas. Os resultados mostraram que muitos produtos farmacêuticos presentes nas águas residuais podem ser eficientemente oxidados com o ozônio e que os sólidos em suspensão têm apenas uma influência menor na eficiência da oxidação de micropoluentes não absorventes.

Nesta área de pesquisa dos resíduos farmacêuticos, Nakada *et al.* (2006) verificaram os produtos químicos farmacêuticos e desreguladores endócrinos em águas residuais municipais de Tóquio e sua remoção durante o tratamento com lodo ativado. No estudo foram medidos seis analgésicos ou anti-inflamatórios ácidos (aspirina, ibuprofeno, naproxeno, cetoprofeno, fenoprofeno, ácido mefenâmico), dois anti-sépticos fenólicos (timol, triclosan), quatro produtos farmacêuticos amida (propifenazona, crotamiton, carbamazepina, desidrololitolol), três antissépticos fenólicos (timol, triclosan), quatro fármacos amida (propifenazona, crotamiton, carbamazepina, desidrolol) produtos químicos (nonilfenol, octilfenol, bisfenol A), e três estrogénios naturais ( $17\beta$ -estradiol, estrona, estriol) em amostras compostas de 24 h de afluentes e efluentes secundários recolhidos sazonalmente de cinco estações de tratamento de águas residuais municipais em Tóquio. A aspirina foi mais abundante no influente, com uma concentração média de 7300 ng/L, seguido de crotamiton (921 ng/L), ibuprofeno (669ng/L), triclosan (511ng/L) e dietiltoluamida (503ng/L). Essas concentrações foram 1 ordem de magnitude inferior às relatadas nos EUA e na Europa. Isso pode ser atribuído ao menor consumo de produtos farmacêuticos no Japão.

Também Heberer (2002) fez um rastreamento de resíduos farmacêuticos persistentes do esgoto municipal à água potável, em áreas urbanas como Berlim (Alemanha), com altas descargas de água de esgoto municipal e baixos fluxos de água superficial, existe um risco potencial de contaminação da água potável por compostos orgânicos polares quando a recarga de água subterrânea é usada na produção de água potável. Assim, alguns compostos farmacologicamente ativos não são completamente eliminados nas estações municipais de tratamento de esgoto (ETE) e são descartados como contaminantes nas águas receptoras.

Dermirbas (2001), o quinto trabalho mais citado com 679 citações, discutiu a utilização dos resíduos sólidos urbanos em instalações de recursos de biomassa e processamento de conversão de biomassa para combustíveis e produtos químicos, dando continuidade posteriormente na análise das características de combustão de diferentes combustíveis de biomassa (DEMIRBAS, 2004)

Um trabalho que está de encontro com a área de pesquisa deste trabalho é o de Werther (1999), no presente artigo de revisão, são discutidas várias questões relacionadas à combustão do lodo de esgoto. Depois de explicar brevemente a formação e o tratamento do lodo de esgoto, discutimos a produção atual e futura de

lodo. Posteriormente, são examinados os quatro métodos de disposição de lodo atualmente utilizados, ou seja, reciclagem na agricultura, aterro sanitário, despejo no mar e incineração, e a tendência futura apresentada mostra o crescente papel da incineração de lodo. Posteriormente, são apresentadas tecnologias para processamento térmico de lodo de esgoto. Eles são discutidos em três grupos, ou seja, mono-combustão, co-combustão e processos alternativos. Vários incineradores de mono-combustão, incluindo fornos múltiplos, leito fluidizado e fornos de fundição são discutidos brevemente, enquanto que para a co-combustão, a atenção foi dada à co-combustão com carvão em queimadores de carvão de leito pulverizado e fluidizado, bem como à co-incineração com resíduos sólidos municipais em vários fornos. Sempre que possível, são apresentados dados de plantas de grande escala. Atualmente estão sendo discutidos nos ciclos de descarte de lodo os processos térmicos alternativos à combustão do lodo. Isso inclui oxidação úmida, pirólise, óleo de processos de lodo e combinações de processos de pirólise, combustão e gaseificação.

Algumas dessas tecnologias alternativas também são discutidas brevemente. Um aspecto importante durante o processamento térmico do lodo de esgoto são seus mecanismos de combustão. Comparado ao carvão, o lodo de esgoto possui um conteúdo muito alto de umidade e matéria volátil, o que pode afetar o processo de combustão. A importância dos processos de secagem e desvolatilização para a combustão do lodo de esgoto é assim examinada. Em um caso especial, a liberação e combustão dos voláteis durante a combustão de lodo em combustores de leito fluidizado é analisada e são apresentadas algumas informações sobre a combustão do carvão de lodo. Outra questão importante da combustão de lodo é a emissão de gases poluentes e o manuseio de subprodutos sólidos. Preocupam-se os metais pesados, mercúrio, dioxinas e furanos, gases ácidos e também o NO. Outro ponto relevante da pesquisa da combustão de lodo é a emissão de gases poluentes e o manuseio de subprodutos sólidos. Preocupam-se os metais pesados, mercúrio, dioxinas e furanos, gases ácidos e também o NO. Outra questão importante da combustão de lodo é a emissão de gases poluentes e o manuseio de subprodutos sólidos, em especial preocupam-se os metais pesados, mercúrio, dioxinas e furanos, gases ácidos e também o NO<sub>x</sub> e N<sub>2</sub>O.

A utilização da pirólise no tratamento dos resíduos sólidos, também foi tema do trabalho de *Olie et al. (1977)*, analisando os componentes vestigiais de cinzas volantes e gases de combustão de alguns incineradores municipais na Holanda.

Outra pesquisa utilizando o tratamento térmico dos resíduos encontramos em *McKay (2002)*, onde pesquisou-se a caracterização, formação e minimização de dioxinas durante a incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU). No trabalho de revisão discute-se as visões atuais sobre métodos para minimizar dioxinas, nomeadamente dibenzodioxinas policloradas (PCDDs) e dibenzofuranos (PCDFs), formação em sistemas de incineração de RSU. É apresentada uma análise detalhada das teorias que levam à formação de dioxinas na incineração de RSU, uma vez que essa tem sido uma das áreas mais controversas da química das dioxinas nos últimos 20 anos.

Os tratamentos biológicos também estão presentes nestes vinte trabalhos mais citados sobre o tema. *Zucconi et al. (1981)*, avaliaram a toxicidade de composto imaturo.

Em *Angelidaki et al. (2009)* pesquisou-se a aplicação da tecnologia de digestão anaeróbia está crescendo em todo o mundo devido aos seus benefícios econômicos e ambientais. Como consequência, vários estudos e atividades de pesquisa que lidam com a determinação do potencial de biogás de substratos orgânicos sólidos vêm sendo realizados nos últimos anos. Portanto, é de particular importância definir um protocolo para a determinação do potencial final de metano para um dado substrato sólido. De fato, esse parâmetro determina, em certa medida, os detalhes econômicos e de projeto de uma planta de biogás. Além disso, a definição de unidades comuns a serem usadas em ensaios anaeróbios é cada vez mais solicitada à comunidade científica e de engenharia.

Também o trabalho *Lay et al. (1999)* analisaram a viabilidade da produção biológica de hidrogênio a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. Os resíduos sólidos urbanos orgânicos e dois microorganismos de sementes, ou seja, lodo digerido pré-tratado com calor e bactérias produtoras de hidrogênio enriquecidas a partir de silo de farelo de soja, variaram de acordo com um projeto experimental composto central e fatorial completo, com o objetivo de avaliar a viabilidade do hidrogênio.

*Pandey (2003)* pesquisou a fermentação em estado sólido. A fermentação em estado sólido emergiu como uma tecnologia potencial para a produção de produtos

microbianos, como ração, combustível, alimentos, produtos químicos industriais e produtos farmacêuticos. Sua aplicação em bioprocessos como biolixiviação, biobeneficiação, biorremediação, biopulpação, etc. ofereceu várias vantagens. A utilização de resíduos agroindustriais como substratos nos processos fornece uma alternativa e agregação de valor a esses resíduos, de outra forma subutilizados ou não utilizados.

Também aparecem nestes vinte artigos mais citados, dois trabalhos sobre resíduos de alimentos. Zhang *et al.* (2007) fizeram a caracterização de resíduos alimentares como matéria-prima para digestão anaeróbia, por meio do estudo sobre o desperdício de alimentos coletado na cidade de San Francisco, Califórnia, onde as variações diárias e semanais da composição do desperdício de alimentos durante um período de dois meses foram medidas. A digestibilidade anaeróbia e os rendimentos de biogás e metano do desperdício alimentar foram avaliados usando testes de digestão anaeróbia em batelada, realizados a 50°C. Os resultados deste estudo indicam que o desperdício de alimentos é um substrato altamente desejável para digestores anaeróbios no que diz respeito à sua alta biodegradabilidade e rendimento de metano.

Já Canakci (2007) pesquisou o potencial de resíduos de lipídios de restaurantes como matérias-primas para biodiesel. O biodiesel é geralmente produzido a partir de óleos vegetais de qualidade alimentar que são mais caros que o diesel. Portanto, o biodiesel produzido a partir de óleo vegetal de qualidade alimentar atualmente não é economicamente viável. Óleos residuais, graxa de restaurante e gorduras animais são potenciais matérias-primas para o biodiesel. Essas matérias-primas baratas representam um terço da produção total de gorduras e petróleo dos EUA, mas atualmente são dedicadas principalmente a usos industriais e ração animal. As características da matéria-prima são muito importantes durante o estágio inicial de pesquisa e produção. Ácidos graxos livres e umidade reduzem a eficiência da transesterificação na conversão dessas matérias-primas em biodiesel.

Outro trabalho muito citado, apesar de recente é o de Jambeck *et al.* (2015), que estudaram um tema com muita discussão atualmente, os insumos de resíduos plásticos da terra para o oceano. Os detritos plásticos no ambiente marinho são amplamente documentados, mas a quantidade de plástico que entra no oceano a partir de resíduos gerados em terra é desconhecida. Ao vincular dados mundiais

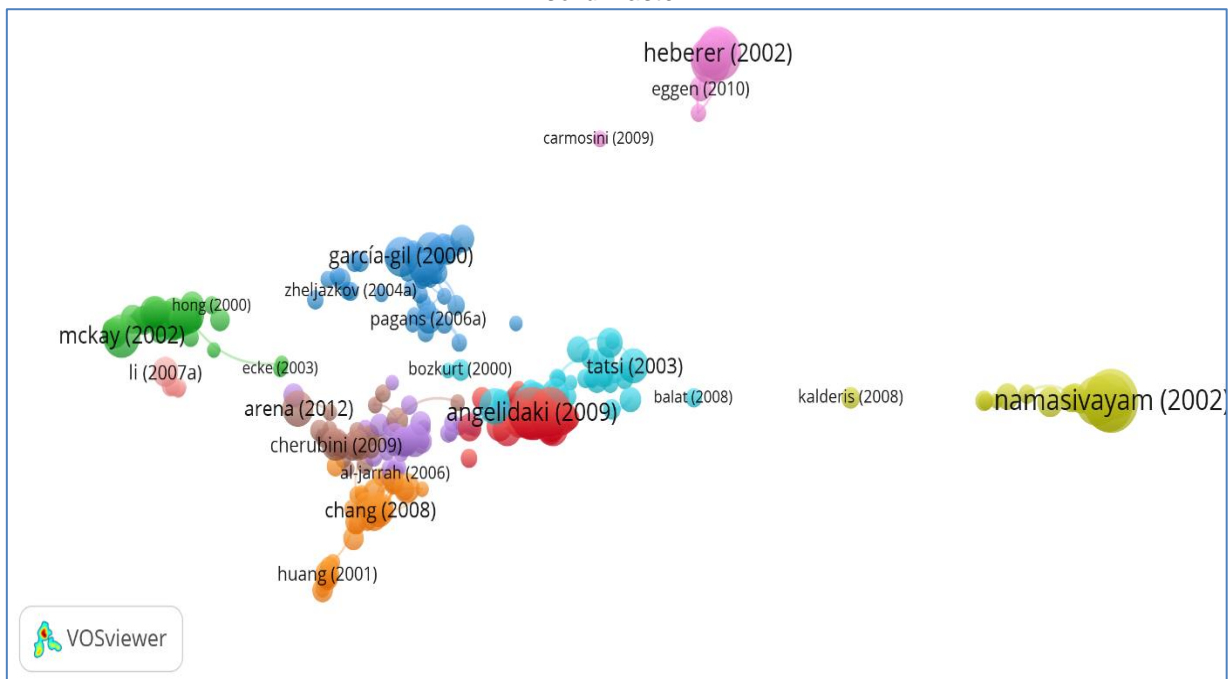
sobre resíduos sólidos, densidade populacional e status econômico, estimamos a massa de lixo plástico terrestre que entra no oceano. Calculou-se que 275 milhões de toneladas de resíduos de plástico foram geradas em 192 países costeiros em 2010, com 4,8 a 12,7 milhões de toneladas entrando no oceano. O trabalho conclui que sem melhorias na infraestrutura de gerenciamento de resíduos, a quantidade acumulada de resíduos plásticos disponíveis para entrar no oceano a partir da terra deverá aumentar em uma ordem de magnitude até 2025.

Num estudo mais amplo, analisando o planejamento urbano das cidades, Kennedy (2007), faz a análise do metabolismo em mudança das cidades, por meio de dados de estudos de metabolismo urbano de oito regiões metropolitanas de cinco continentes, realizados em vários anos desde 1965, são reunidos em unidades consistentes e comparados. Juntamente com estudos de fluxos de água, materiais, energia e nutrientes de cidades adicionais, a comparação fornece informações sobre o metabolismo em mudança das cidades. A maioria das cidades estudadas apresenta um aumento do metabolismo per capita em relação à água, águas residuais, energia e materiais, embora uma cidade tenha mostrado uma eficiência crescente de energia e água nos anos 90. Mudanças nos fluxos de resíduos sólidos e nas emissões de poluentes atmosféricos são variadas.

A revisão também identifica processos metabólicos que ameaçam a sustentabilidade das cidades. Isso inclui níveis alterados das águas subterrâneas, exaustão de materiais locais, acúmulo de materiais tóxicos, ilhas de calor no verão e acúmulo irregular de nutrientes. Além das preocupações com as grandes magnitudes dos fluxos de recursos nas cidades, é essencial um entendimento desses processos de acumulação ou armazenamento no metabolismo urbano. O crescimento, que é inerentemente parte do metabolismo, causa alterações na água armazenada nos aquíferos urbanos, nos materiais do estoque de construção, no calor armazenado na camada do dossel urbano e nos nutrientes potencialmente úteis nos lixões urbanos.

A Figura 14 apresenta o relacionamento entre os autores, a partir da utilização do software *VOSviewer*. Este relacionamento acontece a partir das citações encontradas nos artigos descritos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo "*solid waste*".

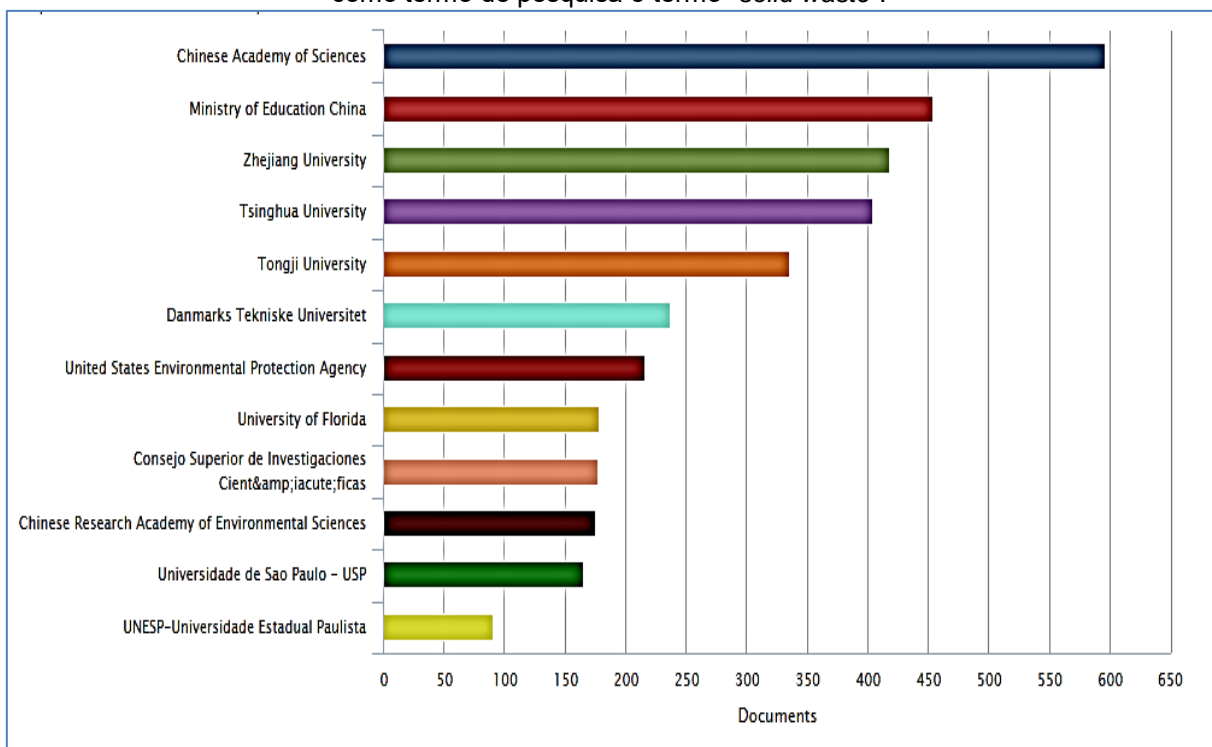
Figura 14 - Rede de relacionamento de artigos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo "solid waste"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Os dados da *Scopus* nos permitem verificar quais são as instituições de ensino que mais tem publicado artigos sobre o tema. O Gráfico 15 resume as instituições com maior quantidade de publicações.

Gráfico 15 - Quantidade de artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo "solid waste".



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

É possível verificarmos a grande quantidade de trabalhos publicados pelas instituições chinesas, em menor quantidade as americanas e as brasileiras Universidade de São Paulo e Universidade Estadual Paulista que juntas tem pouco mais de 200 trabalhos publicados neste período.

As palavras-chave que mais apareceram nestes trabalhos podem ser verificadas na apresentação da Tabela 5.

Tabela 5 – Palavras-chave com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando-se o termo “solid waste”

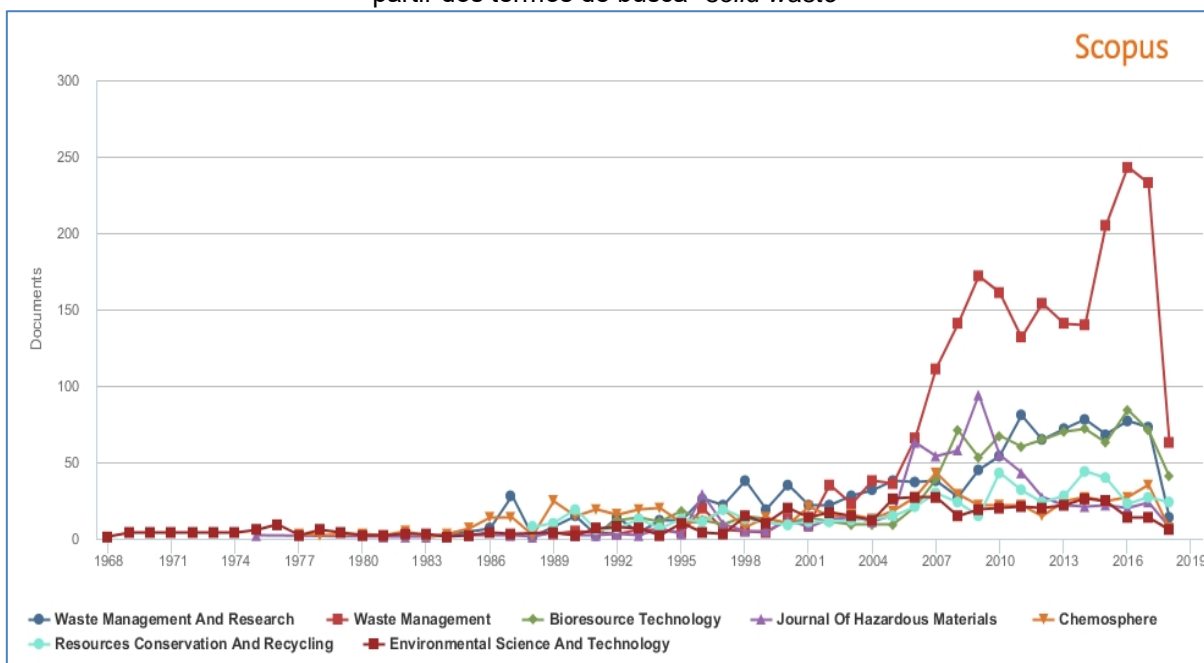
	Palavra-chave	Citações	%
1	Municipal Solid Waste	9.707	27%
2	Solid Wastes	8.328	23%
3	Solid Waste Management	8.232	23%
4	Solid Waste	7.753	22%
5	Waste Management	6.541	18%
6	Waste Disposal	5.661	16%
7	Priority Journal	5.415	15%
8	Refuse Disposal	4.670	13%
9	Recycling	4.658	13%
10	Landfill	4.561	13%
11	Composting	2.368	7%
12	Sewage	1.675	5%

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

A palavra-chave que mais incidiu nos trabalhos foi “*Municipal Solid Waste*”, compreendendo um percentual de incidência de 27% dos trabalhos. Os “*Management*” também aparecem com muita frequência. Notamos a preocupação com a compostagem em 7% dos artigos.

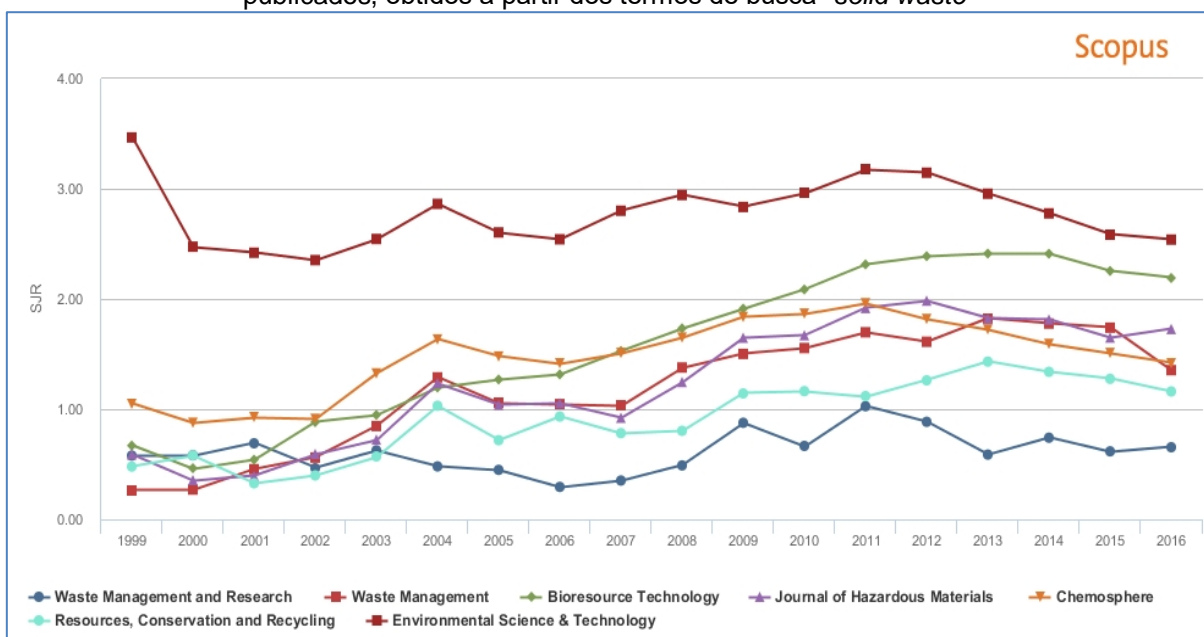
Também foi possível, por meio da análise do Gráfico 16, verificarmos quais foram os periódicos que mais publicaram artigos relacionados aos resíduos sólidos. Também foi possível identificar pelo Gráfico 17 os indicadores *SCImago Journal Rank (SJR)* dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca “*solid waste*”.

Gráfico 16 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "solid waste"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus

Gráfico 17 - Indicadores SCImago Journal Rank (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "solid waste"

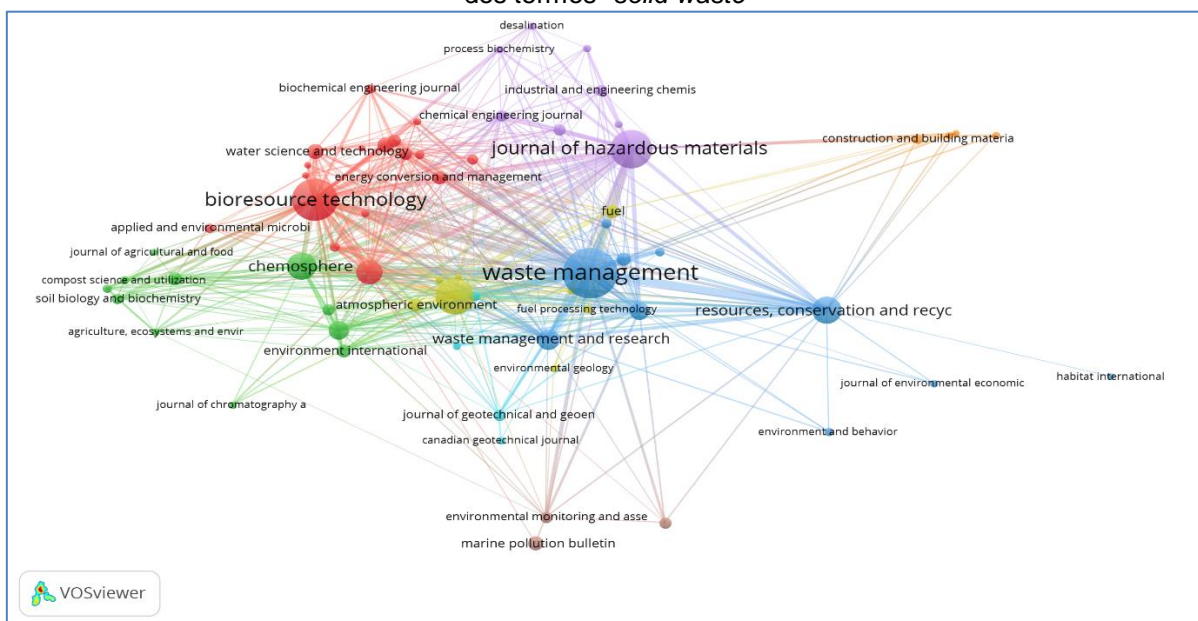


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus

Analisando os dois gráficos verificamos o grande crescimento de artigos publicados a partir de 2004, e destacamos os periódicos *Waste Management*, *Environmental Science e Technology* e *Bioresource Technology*. Também foi possível verificarmos a rede de relacionamentos entre estes periódicos e notamos a

grande influência exercida pelo periódico *Waste Management*, como podemos verificar na Figura 15.

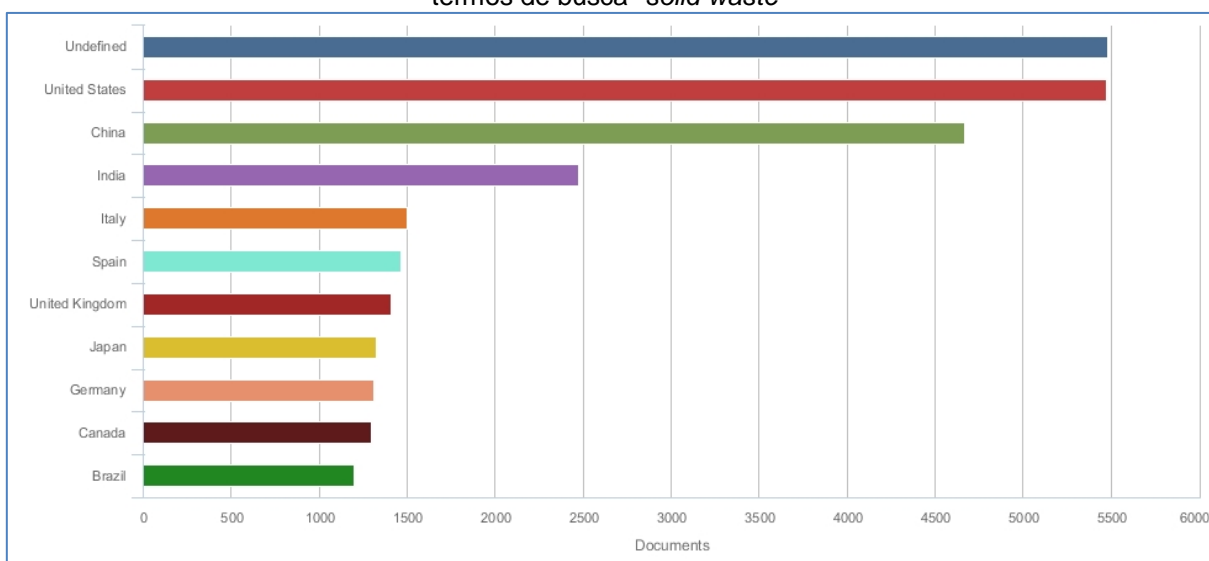
Figura 15 - Rede de periódicos com maior número de citações de trabalhos obtidos a partir da busca dos termos "solid waste"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

O gráfico 18 demonstra quais são os países com maior número de publicações. Verificamos que os Estados Unidos e China também lideram este ranking, porém a ordem se inverte. Provavelmente pelo maior número de instituições americanas. A Figura 16 apresenta também o relacionamento dos pesquisadores, baseados nos países de publicação dos artigos, com destaque para Estados Unidos, China, Índia e Espanha nas pesquisas sobre os resíduos sólidos.

Gráfico 18 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "solid waste"

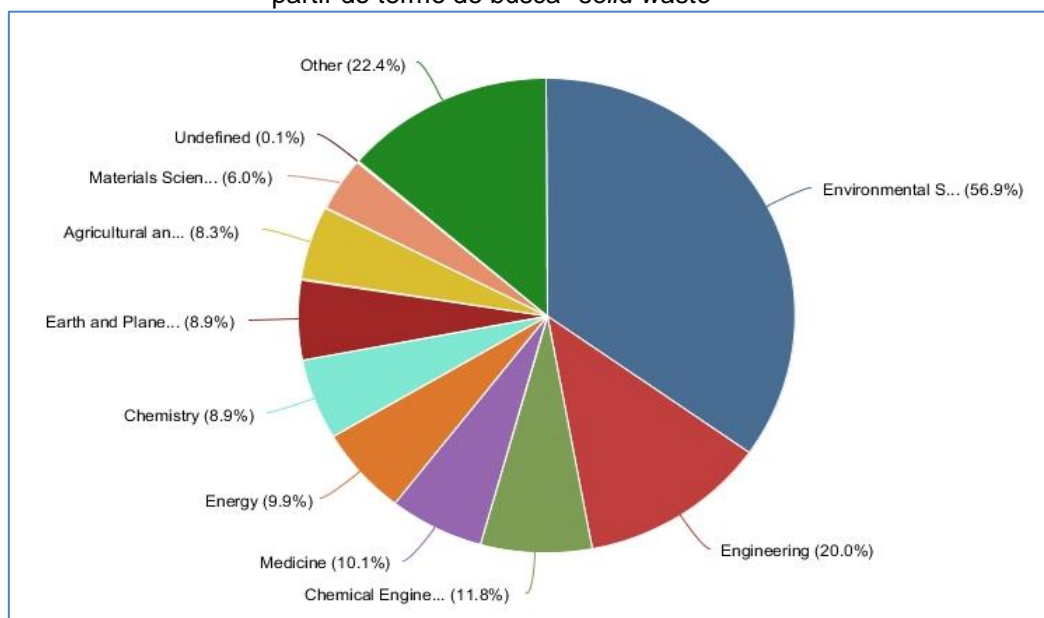


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.



conhecimento de meio ambiente e 20% pela área de engenharia. Mas é notório a variedade de áreas de conhecimento que o termo apresenta publicações.

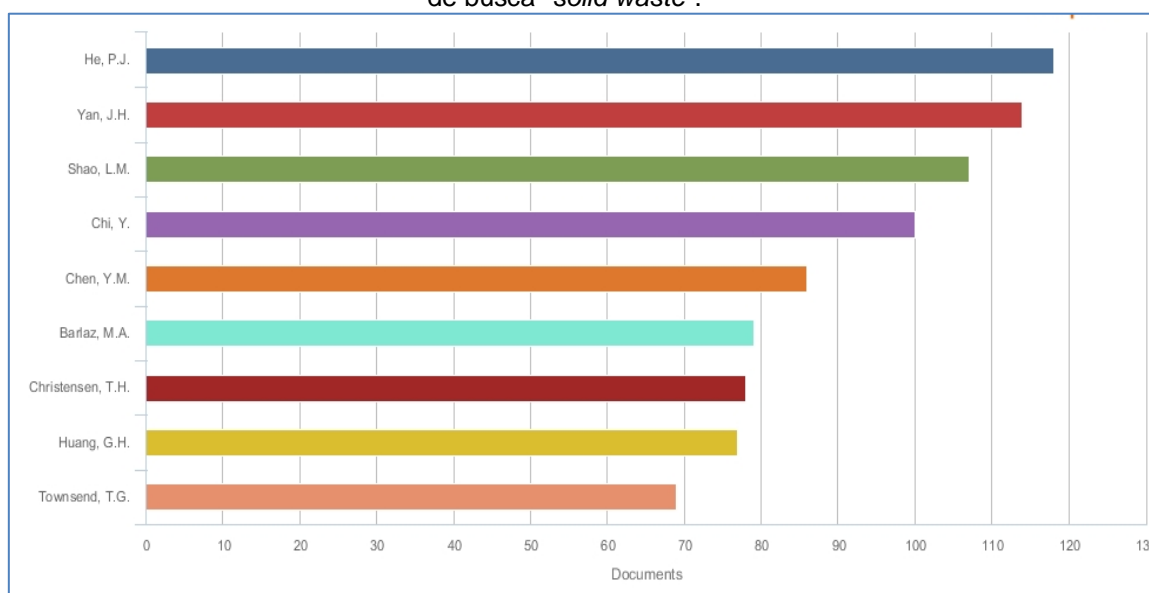
Gráfico 19 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca "solid waste"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

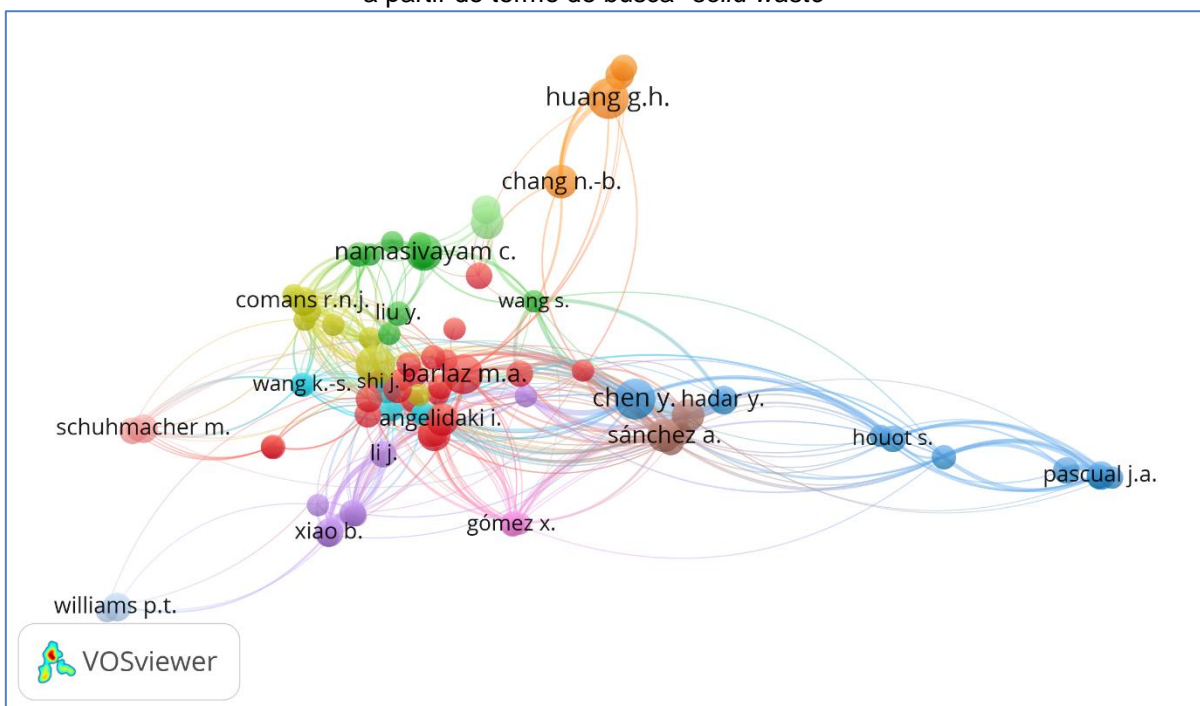
Com relação aos autores mais citados encontramos He, P.J. e Yan, J.M. com mais de 110 artigos publicados cada um como expoentes. O Gráfico 20 apresenta os autores com maior número de publicações. Também podemos verificar pela Figura 18, a rede de relacionamento dos autores que apresentaram maior quantidade de publicações de artigos, obtidos a partir do termo de busca "solid waste".

Gráfico 20 - Autores com maior quantidade de citações de publicações, obtidos a partir do termo de busca "solid waste".



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Figura 18 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de publicações de artigos, obtidos a partir do termo de busca "solid waste"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

## 2.2 COMPOSTAGEM - REVISÃO CONCEITUAL E BIBLIOMÉTRICA

A compostagem não é uma prática recente. Um dos primeiros registros da aplicação desta técnica na agricultura data do período do Império de Akkad, na Mesopotâmia, há cerca de 4500 anos atrás. Desde então várias civilizações, incluindo chineses, egípcios, gregos e romanos, amontoavam em pilhas a matéria vegetal, estrume, restos de comida e outros tipos de resíduos orgânicos e, deixavam-nos a decompor e a estabilizar até estarem prontos para serem devolvidos ao solo. No entanto, após a II Guerra Mundial, a crescente utilização de fertilizantes químicos aumentou e os métodos tradicionais de fertilização caíram em desuso (ALMEIDA, 2007).

A definição de compostagem, não é universal sendo definida como a decomposição aeróbia de materiais orgânicos, tais como o estrume, folhas, papel e restos de comida promovida por microrganismos e que decorre em condições controladas convertendo a matéria orgânica num produto estável semelhante ao húmus (BARRENA *et al.*, 2011).

Santos (2007) define compostagem como um processo controlado de biooxidação de substratos heterogêneos biodegradáveis, resultante da ação dos microrganismos (bactérias, actinomicetas e fungos) naturalmente associados aos substratos, sendo o principal produto final, designado composto, o qual deve ser homogêneo, resultante da biooxidação de substratos heterogêneos biodegradáveis, suficientemente estável para ser armazenado, higienizado e cuja aplicação ao solo não tenha efeitos adversos para o ambiente.

A compostagem é uma tecnologia adequada ao tratamento, à reciclagem e à valorização de biomassas como, por exemplo, a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, resíduos orgânicos de origem agropecuária, agroindustrial e florestal, assumindo cada vez mais importância em virtude da produção de resíduos e, em especial a dos resíduos sólidos urbanos ter aumentado nos últimos anos (PONSA, 2009).

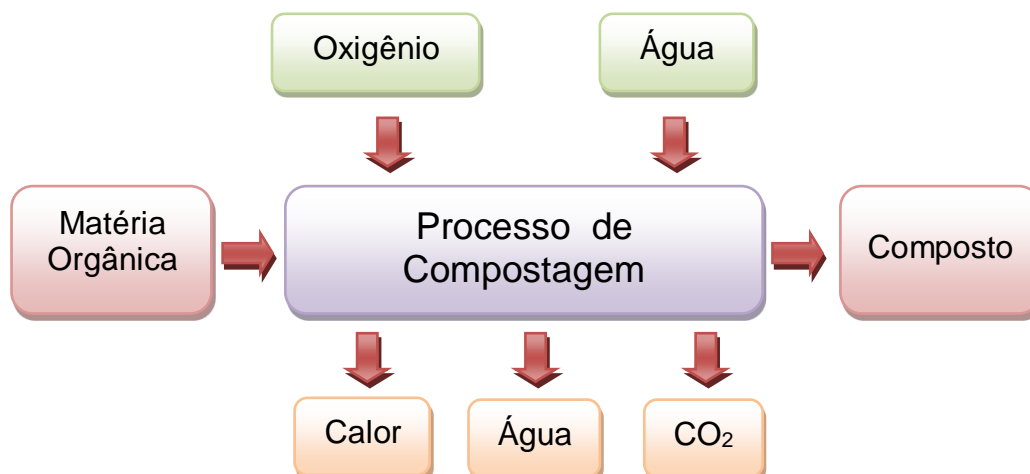
Segundo Santos (2007) o processo de compostagem decorre em duas fases: a ativa e a de acabamento (*curing*). A fase ativa da compostagem é caracterizada pela rápida e intensa biotransformação aeróbia e por temperaturas elevadas, já que as reações de degradação são muito intensas, ocorrendo a liberação de energia na forma de calor, CO<sub>2</sub> e vapor de água.

A fase de acabamento (*curing*), que se segue à fase ativa, é caracterizada como sendo uma fase de lenta e progressiva diminuição da temperatura.

Queda (2007) define compostagem como um processo controlado de biooxidação de substratos heterogêneos biodegradáveis, resultante da ação dos microrganismos (bactérias, actinomicetes e fungos) naturalmente associados aos substratos, durante o qual ocorre uma fase termófila, onde ocorre a liberação temporária de substâncias com efeito fitotóxico e na qual as biomassas sofrem profundas transformações (mineralização e humificação parciais), sendo o principal produto final, designado composto.

Sendo uma digestão aeróbia de resíduos orgânicos, na qual ocorre a degradação da matéria orgânica por intermédio de microrganismos, além da matéria orgânica necessita, de oxigênio e água produzindo dióxido de carbono, água e calor, pois trata-se de uma reação biológica exotérmica, obtendo-se assim o produto principal, o composto (Figura 19).

Figura 19 - Representação esquemática das entradas e saídas do processo de compostagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Entre os benefícios apontados pelos diversos autores, da compostagem e do composto resultante, pode-se citar:

- a) O composto atua no solo como uma esponja, ajudando-o a reter umidade e nutrientes;
- b) O composto ajuda a melhorar as características dos solos, quer sejam argilosos ou arenosos, concedendo-lhes outra estrutura;
- c) Os solos ricos em composto são menos afetados pela erosão;
- d) O uso de composto aumenta os nutrientes do solo, reduzindo o recurso ao uso de fertilizantes químicos;
- e) Reduz significativamente a quantidade de resíduos a depositar em aterro;
- f) Fornece um material rico em nutrientes que melhora o desenvolvimento de plantas, jardins e relvados;
- g) Reduz o potencial poluidor da agricultura intensiva, resultante da introdução no solo de nutrientes, como o azoto, num estado químico que reduz a sua solubilidade e conseqüente arrastamento;
- h) Para além dos benefícios sanitários, económicos e ambientais (se corretamente operado), o tratamento de resíduos por compostagem apresenta ainda uma vantagem adicional: o produto final apresenta várias características que permitem a sua utilização como corretivo orgânico (fertilizante que se destina, sobretudo, a fornecer matéria orgânica).

Mas o processo de compostagem não acontece de maneira aleatória, é necessário analisar os parâmetros físico-químicos para um resultado eficiente.

## 2.2.1 Parâmetros físico-químicos que interferem no processo de compostagem

Para que o processo de compostagem se desenvolva de maneira satisfatória, é necessário que alguns parâmetros físico-químicos sejam respeitados permitindo que os microrganismos encontrem condições favoráveis para se desenvolverem e transformarem a matéria orgânica.

Os principais fatores que influenciam o processo de compostagem são os que afetam, direta ou indiretamente o metabolismo dos microrganismos que são responsáveis pela decomposição dos resíduos e sua transformação num produto estável e rico em substâncias húmicas — o composto (SANTOS, 2007).

Os fatores mais importantes são: a temperatura, a qual varia em função da atividade microbiana; pH, o valor ótimo está compreendido entre 5 e 8; o arejamento: um excesso de ventilação pode provocar o arrefecimento da biomassa e retardar o processo de compostagem; o teor de umidade: durante a fase de decomposição, na qual a atividade bacteriana é predominante, as biomassas a compostar deverão ter teores de umidade compreendidos entre 45 e 65 %. Para teores de umidade inferiores a 40%, a atividade microbiana decresce, e para valores superiores a 65% a água expelle o ar da maior parte dos interstícios existentes entre as partículas da biomassa, o que dificulta a difusão do oxigênio e pode originar condições de microaerofília ou mesmo de anaerobiose (SANTOS, 2007).

### 2.2.1.1 Aeração

Para Fernandes *et al.* (1999), sendo a compostagem um processo aeróbio, o fornecimento de ar é vital à atividade microbiana, pois os microrganismos aeróbios têm necessidade de O<sub>2</sub> para oxidar a matéria orgânica que lhes serve de alimento.

Durante a compostagem, a demanda por O<sub>2</sub> pode ser bastante elevada e a falta deste elemento pode se tornar em fator limitante para a atividade microbiana e prolongar o ciclo de compostagem.

O ar contido nos interstícios da massa de material em compostagem é importante para o metabolismo e tipo de microrganismos envolvidos no processo. De

acordo com Haug (1993) o oxigênio é necessário aos microrganismos no processo de obtenção de energia resultante da oxigenação do carbono orgânico.

Assim, nota-se que ao longo do processo de compostagem ocorre o aumento gradual de dióxido de carbono e conseqüente diminuição do oxigênio. (RUSSO, 2003).

O arejamento da massa em compostagem deve ser constante, para que não se alterem as atividades metabólicas dos microrganismos e o processo de degradação da matéria orgânica seja mais rápido por via da oxigenação de moléculas orgânicas presentes na massa. Para Pereira Neto (1996) o arejamento é o fator mais importante para o controle de diversos parâmetros da compostagem, haja vista que o mesmo proporciona, além do suprimento de oxigênio aos microrganismos, o controle da temperatura e umidade, e conseqüente remoção de odores.

A circulação de ar na massa do composto é, portanto, de importância primordial para a compostagem rápida e eficiente. Esta circulação depende da estrutura e umidade da massa e também da tecnologia de compostagem utilizada.

Para Andreoli *et al.* (2001), a aeração também influi na velocidade de oxidação do material orgânico e na diminuição da emissão de odores, pois quando há falta de aeração o sistema pode tornar-se anaeróbio.

Seja qual for a tecnologia utilizada, a aeração da mistura é fundamental no período inicial da compostagem, na fase de degradação rápida, onde a atividade microbiana é intensa. Na fase seguinte, a maturação, a atividade microbiana é pouco intensa, logo a necessidade de aeração é bem menor.

O lodo de esgoto, resíduo utilizado nas quatro primeiras bateladas, e objeto de estudo deste trabalho, é um resíduo de granulometria fina e quando está parcialmente desidratado, apresenta aspecto pastoso, o que dificulta a difusão do ar. Por esta razão, o lodo normalmente será misturado a outro resíduo, com granulometria mais grosseira, capaz de atuar como agente estruturante na mistura, permitindo assim a criação dos espaços vazios necessários à difusão do ar (FERNANDES *et al.*, 1999).

### 2.2.1.2 Temperatura

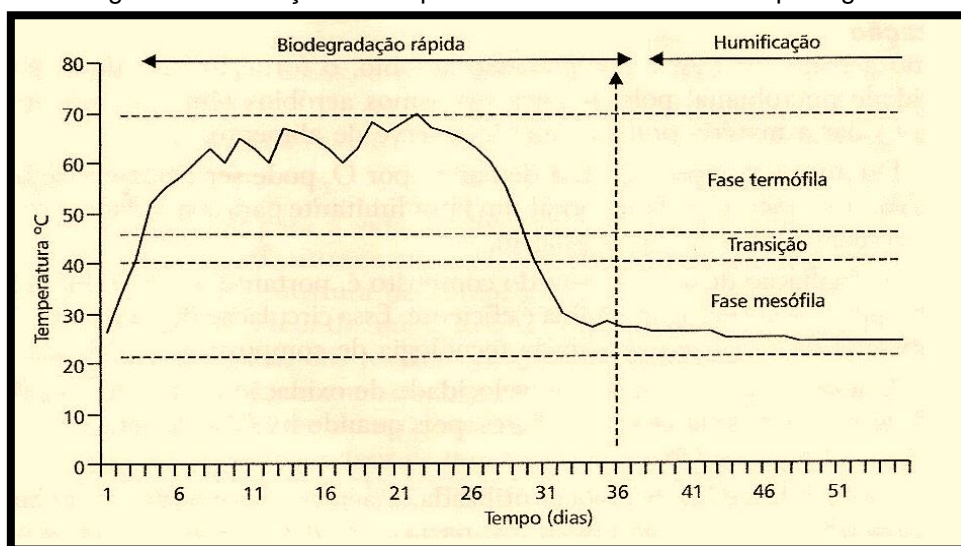
A temperatura é um dos principais fatores que controlam o processo de compostagem. Os microrganismos possuem metabolismo exotérmico, ou seja, realizam a decomposição da matéria orgânica gerando calor e elevando a temperatura da leira, devido às propriedades isolantes da massa em compostagem (KIEHL, 1998).

Sendo assim, a produção de calor de um material é um indicativo da atividade biológica na leira de compostagem e, por isso, indiretamente do seu grau de decomposição (HAUG, 1993). A compostagem aeróbia pode ocorrer tanto em regiões de temperatura termofílica (45 a 85°C) como mesofílica (25 a 43°C).

Depois de iniciada a fase termofílica (em torno de 45°C), onde a cinética de crescimento das bactérias é acelerado, o ideal é controlar a temperatura entre 55 e 65°C. Esta é a faixa que permite a máxima intensidade de atividade microbiológica. Acima de 65°C a atividade microbiológica cai e o ciclo de compostagem fica mais longo.

Pode-se observar a evolução da temperatura, durante o processo de compostagem, através da Figura 20.

Figura 20 - Evolução da temperatura em uma leira de compostagem



Fonte: Andreoli *et al.* (2001).

Embora a elevação da temperatura seja necessária e interessante para a eliminação de microrganismos patogênicos, alguns pesquisadores observaram que a ação dos microrganismos sobre a matéria orgânica aumenta com a elevação da

temperatura até 65°C e que acima deste valor o calor limita as populações aptas, havendo um decréscimo da atividade biológica.

De acordo com Epstein (1997) as variações de temperatura são responsáveis pela alternância das diferentes populações bacterianas presentes na massa de resíduos. As faixas de temperatura que definem a predominância de determinados grupos de organismos podem ser classificadas em: criófilas (temperatura ambiente), mesófilas (até 55°C) e termófilas (acima de 55°C). Temperaturas acima de 70°C não são aconselháveis, visto que nesta faixa a atividade dos microrganismos torna-se reduzida, resultando na paralisação do processo e, conseqüentemente, no declínio da temperatura (KIEHL, 1998). A temperatura é um fator indicativo do equilíbrio biológico, de fácil monitoramento e que reflete a eficiência do processo. Se a leira, em compostagem, registrar temperatura da ordem de 40°C à 60°C no segundo ou terceiro dia é sinal de que o ecossistema está bem equilibrado e que a compostagem tem todas as chances de ser bem sucedida. Caso contrário, é sinal de que algum ou alguns parâmetros físico-químicos (pH, relação C/N, umidade) não estão sendo respeitados, limitando assim a atividade microbiana (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Atualmente, a aeração também é usada como meio de controlar a temperatura. Em certos casos o insuflamento de ar comprimido na massa do composto pode ser de 5 a 10 vezes maior do que o estritamente necessário à respiração microbiana, tendo assim a função de dissipar o calor liberado no processo.

A temperatura é também um fator muito importante quando se tem o intuito de eliminar patógenos. Elevadas temperaturas durante o processo de compostagem levam à destruição de sementes de ervas daninhas, microrganismos patogênicos, larvas de insetos e vermes (GAJALAKSHMI; ABBASI, 2008).

Embora a maioria dos parâmetros de controle da contaminação biológica na compostagem baseie-se em valores, tais como os encontrados na Tabela 6, Lelis e Pereira Neto (2001a), ao estudarem a contaminação biológica na compostagem de resíduos sólidos domiciliares, comprovaram ser necessário, em condições reais de trabalho, no mínimo vinte dias sob temperatura termófila para se alcançar uma inativação satisfatória dos patógenos, seguindo-se, obrigatoriamente, a fase de maturação do processo onde ocorre, inclusive, a ação natural de antibióticos na eliminação de eventuais patógenos remanescentes.

Na Tabela 6 está apresentado a temperatura e o intervalo de tempo, necessários para a destruição dos tipos mais comuns de microrganismos patogênicos e parasitas.

Tabela 6 - Condições de inativação de parasitas e microrganismos patogênicos na compostagem

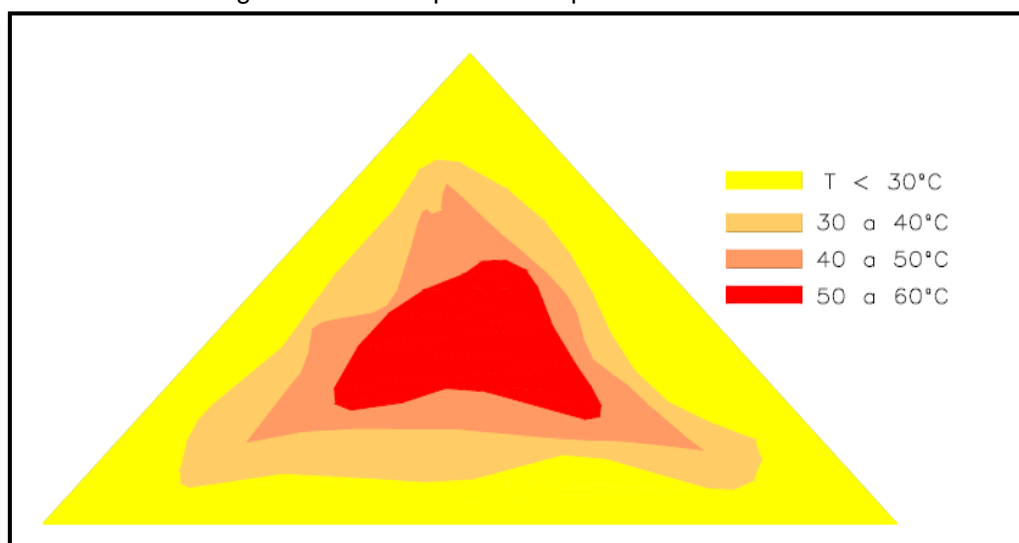
Microrganismo/Parasita	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
Necator Americanus	45	50
Entamoeba histolística	45	3
Entamoeba histolística (cistos)	55	-
Micrococcus pyogenes	50	10
Ascaris lumbricóides	50 a 70	60m a 43h
Streptococcus pyogenes	54	10
Taenia saginata	55	3
Corynebacterium Diphtherine	55	50
Salmonella SP.	55	60
Salmonella Typhosa	60	30
Shigella Sp.	55	60
Escherichia Coli	55	60
E. Coli (cistos)	60	20
Trichinella spiralis (larvas)	55	3
Trichinella spiralis (cistos)	60	1
Bricella Abortus	55	30
Micobacterium Tuberculosis	67	20

Fonte: Adaptado pelo autor de Lelis e Pereira Neto, 2001.

Diante da observação desse fenômeno, pode-se concluir que o controle da temperatura é fator de extrema importância para a maximização da decomposição, eliminação de patógenos prejudiciais à saúde humana e para todo o processo de compostagem (RAMEH ,1981 apud BARREIRA, 2005).

É interessante notar que a temperatura nas leiras, durante o processo de compostagem nesta forma de processamento, não é uniforme, como pode ser observado através da Figura 21.

Figura 21 - Perfil típico de temperatura em uma leira.



Fonte: Russo, 2003.

Assim, a Figura 21 representa um perfil típico de temperatura em leiras de compostagem submetidas a processos aeróbios, nas quais, de um modo geral, observa-se que as temperaturas se desenvolvem do interior para o exterior de forma decrescente.

### 2.2.1.3 Umidade

Sendo a compostagem um processo biológico de decomposição da matéria orgânica, a presença de água é imprescindível para as necessidades fisiológicas dos organismos, os quais não vivem na ausência de umidade. (KIEHL, 1985).

Do ponto de vista teórico, o teor de umidade ideal para propiciar a degradação dos resíduos orgânicos é 100%. Entretanto, devido à necessidade de se obter uma configuração geométrica definida, bem como de manter uma porosidade adequada à passagem livre do ar para oxigenação do material, a umidade fica restringida a um valor máximo, situado em torno de 60% (PEREIRA NETO, 1996).

No composto, o teor ótimo de umidade, de modo geral, situa-se entre 50 e 60%. O ajuste da umidade pode ser feito pela criteriosa mistura de componentes ou pela adição de água.

Na prática se verifica que o teor de umidade depende também da eficácia da aeração, das características físicas dos resíduos (estrutura, porosidade). Elevados teores de umidade (>65%) fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio, o que poderá provocar aparecimento de zonas de anaerobiose. Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40% a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação.

Para Fernandes *et al.* (1999) como há perdas de água devido à aeração, em geral, o teor de umidade do composto tende a diminuir ao longo do processo. O teor de umidade é um dos parâmetros que devem ser monitorados durante a compostagem para que o processo se desenvolva satisfatoriamente.

Assim, elevados teores de umidade, ou seja, maiores que 65%, fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio, o que poderá provocar aparecimento de zonas de anaerobiose. Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40%, a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação (FERNANDES *et al.*, 1999).

Segundo Silva (2000) apud (BRITO, 2008), a umidade está diretamente relacionada com o tamanho das partículas e com o tamanho e formato das leiras. Quanto menores e mais finas forem as partículas, maior será a capacidade de retenção da umidade. Com relação ao tamanho das leiras pode-se concluir que as pequenas tendem a perder mais umidade. À medida que a matéria orgânica vai se humificando, sua capacidade de reter umidade também aumenta.

Os lodos a serem compostados devem passar previamente por processo de desaguamento ou desidratação para eliminar o excesso de água. Entretanto, devido à necessidade de se obter uma configuração geométrica definida, bem como de manter uma porosidade adequada à passagem livre do ar para oxigenação do material, a umidade fica restringida a um valor máximo, situado em torno de 60%. (PEREIRA NETO, 1996).

#### 2.2.1.4 Relação carbono/nitrogênio (C/N)

Os microrganismos necessitam de carbono, como fonte de energia, e de nitrogênio para síntese de proteínas. É por esta razão que a relação C/N é considerada como fator que melhor caracteriza o equilíbrio dos substratos.

A relação C/N inicial teoricamente mais favorável para a compostagem é de 30/1, porém, na prática, valores entre 26/1 e 35/1 são capazes de favorecer uma degradação rápida e eficiente. Assim, quanto mais elevada a relação, maior será o tempo necessário para se atingir a humificação da matéria orgânica, visto que os microrganismos absorvem carbono e nitrogênio sempre na relação 30/1, sendo que das 30 partes de carbono assimilado, 2/3 são eliminados na forma de dióxido de carbono e o restante, ou seja, 1/3 assimilado, é imobilizado e incorporado no protoplasma dos microrganismos, vindo posteriormente constituir o húmus (KIEHL, 1998).

Da mesma forma, relações C/N inferiores a 30/1, ou seja, onde há excesso de nitrogênio, também não são favoráveis ao processo de compostagem, visto que nesses casos há o desprendimento de amônia e conseqüente liberação de odores desagradáveis ao meio.

Tanto a falta de nitrogênio quanto a falta de carbono limita a atividade microbiológica. Se a relação C/N for muito baixa pode ocorrer grande perda de

nitrogênio pela volatilização da amônia. Se a relação C/N for muito elevada os microrganismos não encontrarão N suficiente para a síntese de proteínas e terão seu desenvolvimento limitado. Como resultado, o processo de compostagem será mais lento (FERNANDES *et al.*, 1999). A adição de um composto de elevada C/N ao solo, conduz à competição pelo nitrogênio disponível, entre microrganismos e plantas, enquanto que uma relação baixa, pode favorecer o desenvolvimento das plantas

Na Tabela 7 são apontadas as relações ótimas de C/N para a compostagem, segundo alguns autores, mas apesar dos valores sugeridos pelos pesquisadores, constata-se que não poderá ser um valor absoluto, mas que varia com as características do material a compostar (RUSSO, 2003).

Tabela 7 - Relações de C/N ótimas para a compostagem, segundo diversos autores

<b>Relação C/N</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>
30-35/1	Gotaas, H.B.	1959
30/1	Haug, R. T.	1980
< 20/1	Cardenas <i>et al</i>	1980
20-30/1	Golueke, C. G.	1981
5 e 20/1	Chanyasak, <i>et al.</i>	1981
25/1	Bertoldi <i>et al</i>	1983
30-40/1	Pereira Neto, J. T.	1989
25/1 a 40/1	Richard, T. L..	1992

Fonte: Russo (2003)

De acordo com Kiehl (1985), durante a compostagem, a degradação da matéria orgânica leva a uma redução do carbono orgânico. O nitrogênio total, ou seja, o nitrogênio orgânico, nítrico e amoniacal, aumenta em virtude da mineralização, conseqüentemente, ocorre uma diminuição da relação C/N. Isto significa que devem ser adicionados às composteiras materiais misturados que forneçam, mais ou menos, 30 partes de carbono para 1 parte de nitrogênio e durante o processo, 20 partes do carbono são liberadas como dióxido de carbono e utilizadas pelos micro-organismos para obter energia. As outras 10 partes, junto com o nitrogênio, são absorvidas para a sua biomassa. Conteúdos apropriados de nitrogênio e carbono favorecem o ambiente da composteira, proporcionando um composto melhor e sua produção em menos tempo. Assim, ao final do processo de compostagem esta relação chega a valores entre 8/1 e 12/1 (KIEHL, 1998). A Instrução Normativa nº 23/2005 do Ministério da Agricultura estabelece uma relação C/N de 18/1 de valor máximo no final do processo.

Na Tabela 8 são apresentadas as composições de materiais orgânicos que são empregados no processo de compostagem, onde observa-se a relação carbono/nitrogênio de cada um deles.

Tabela 8 - Composição de alguns materiais empregados no preparo do composto (resultados em material seco a 110 °C).

MATERIAL	M.O. (g/kg)	C/N	C (g/kg)	N (g/kg)	P2O5 (g/kg)	K2O (g/kg)
Abacaxi (fibras)	714,1	44/1	396,0	9,0	-	4,6
Arroz (casca)	850,0	63/1	472,5	7,5	1,5	5,3
Arroz (palhas)	543,4	39/1	304,2	7,8	5,8	4,1
Bagaço de cana	585,0	22/1	327,8	14,9	2,8	9,9
Bagaço de laranja	225,1	18/1	127,8	7,1	1,8	4,1
Banana (talos e cachos)	852,8	61/1	469,7	7,7	1,5	5,3
Banana (folhas)	889,9	19/1	490,2	25,8	1,9	-
Borra de café (solúvel)	867,9	25/1	477,5	19,1	1,7	0,2
Cacau (películas)	911,0	16/1	518,4	32,4	14,5	37,4
Cacau (casca do fruto)	886,8	38/1	486,4	12,8	4,1	25,4
Capim-colonião	910,3	27/1	504,9	18,7	5,3	-
Capim-gordura-catingueiro	923,8	81/1	510,3	6,3	1,7	-
Capim-guiné	887,5	33/1	491,7	14,9	3,4	-
Capim-jaraguá	905,1	64/1	505,6	7,9	2,7	-
Capim-limão (cidreira)	915,2	62/1	508,4	8,2	2,7	-
Capim-milhão roxo	916,0	36/1	504,0	14,0	3,2	-
Capim-mimoso	936,9	79/1	521,4	6,6	2,6	-
Capim-pé-de-galinha	869,9	41/1	479,7	11,7	5,1	-
Capim-de-rhodes gigante	894,8	37/1	503,2	13,6	6,3	-
Cápsulas de mamona	943,3	44/1	519,2	11,8	2,9	8,1
Casca semente de algodão	959,8	78/1	530,4	6,8	0,6	12,0
Crotalaria juncea (cânhamo marrom)	914,2	26/1	507,0	19,5	4,0	13,1
Esterco de carneiro	564,9	15/1	319,5	21,3	12,8	26,7
Esterco de coqueira	458,8	18/1	252,0	14,0	5,2	7,4
Esterco de gado	621,1	18/1	345,6	19,2	10,1	16,2
Esterco de galinha	540,0	10/1	304,0	30,4	47,0	18,9
Esterco de porco	462,8	10/1	254,0	25,4	49,3	23,5
Feijão guandu	959,0	29/1	524,9	18,1	5,9	11,4
Feijão de porco	885,4	19/1	484,5	25,5	5,0	24,1
Feijoeiro (palhas)	946,8	32/1	521,6	16,3	2,9	19,4
Fumo (resíduos)	709,2	18/1	390,6	21,7	5,1	27,8
Gramma batatais	908,0	36/1	500,4	13,9	3,6	-
Gramma seca	905,5	31/1	502,2	16,2	6,7	-
Lab Lab	884,6	11/1	501,6	45,6	20,8	-
Mandioca (folhas)	916,4	12/1	522,0	43,5	7,2	-

MATERIAL	M.O. (g/kg)	C/N	C (g/kg)	N (g/kg)	P2O5 (g/kg)	K2O (g/kg)
Mandioca (ramas)	952,6	40/1	524,0	13,1	3,5	-
Mandioca (cascas raiz)	589,4	96/1	326,4	3,4	3,0	4,4
Mamona (cápsulas)	946,0	53/1	625,4	11,8	3,0	18,1
Milho (palhas)	967,5	112/1	537,6	4,8	3,8	16,4
Milho (sabugos)	452,0	101/1	525,2	5,2	1,9	9,0
Mucuna preta	906,8	22/1	492,8	22,4	5,8	29,7
Palha de café	999,9	31/1	511,5	16,5	1,8	18,9
Palha de feijão	946,8	32/1	521,6	16,3	2,9	19,4
Polpa de sisal	673,7	27/1	372,6	13,8	4,7	8,8
Serrapilheira	306,8	17/1	163,2	9,6	0,8	1,9
Serragem de madeira	934,5	865/1	519,0	0,6	0,1	0,1
Torta de babaçu	953,5	14/1	518,0	37,0	19,5	10,9
Torta de coco	945,9	12/1	524,4	43,7	18,8	31,4
Torta de usina de açúcar	787,8	20/1	438,0	21,9	23,2	12,3
Turfa	398,9	57/1	222,3	3,9	0,1	3,2

M.O. - matéria orgânica; C/N - relação carbono-nitrogênio

\*o teor de C (g/kg) foi calculado com base na relação C/N e teores de N informados pelo autor.

Fonte: Adaptado pelo autor de Kiehl, 1981 e 1985.

O lodo de esgoto é um resíduo rico em nitrogênio, apresentando relação C/N entre 5,0 e 11,0. Ele necessita, portanto de um resíduo complementar rico em carbono e pobre em nitrogênio, para que a mistura, criteriosamente determinada, apresente relação C/N em torno de 20 ou 30 (FERNANDES *et al.*, 1999).

### 2.2.1.5 Granulometria: estrutura do material

A granulometria pode ser definida como a proporção relativa dos diferentes grupos de tamanho de partículas existentes e separáveis por peneiramento, constituindo-se em um importante fator de influência para o processo de compostagem de resíduos sólidos domiciliares (KIEHL, 1998).

Devido à relação do tamanho das partículas com a oxigenação da massa em compostagem, tem-se que partículas finas, menores que 2 mm, dificultam o arejamento, enquanto valores acima de 16 mm propiciam o arejamento natural, dispensando revolvimentos constantes (RUSSO, 2003).

Para Fernandes, *et al.* (1999) quanto mais fina é a granulometria, maior é a área exposta à atividade microbiana, o que promove o aumento das reações

bioquímicas, visto que aumenta a área superficial em contato com o oxigênio. Alguns autores obtiveram condições ótimas de compostagem com substratos apresentando de 30 a 36% de porosidade, mas de modo geral, o tamanho das partículas deverá estar entre 25 e 75 mm, para ótimos resultados.

Pereira Neto (1989) recomenda uma granulometria de 20 a 50 mm, em se tratando de compostagem de resíduos sólidos domiciliares, facilitando-se assim, a oxigenação através da formação de massa porosa.

Como o lodo de esgoto normalmente apresenta granulometria muito fina, haveria dificuldade de realizar o processo de compostagem somente com este material, pois fatalmente apresentaria problemas relativos à aeração devido à falta de espaços intersticiais entre as partículas. Esta é uma das principais razões para se combinar o lodo com outro resíduo de granulometria mais grossa, o que confere estrutura porosa à mistura a ser compostada (FERNANDES, 1999).

#### 2.2.1.6 Potencial Hidrogeniônico - pH

Segundo Maragno *et al.* (2007), o pH é tido como um parâmetro que afeta os sistemas de compostagem. A reação da matéria orgânica vegetal ou animal é geralmente ácida. Assim, ao se iniciar a decomposição, ocorre uma fase fitotóxica pela formação de ácidos orgânicos que tornam o meio mais ácido do que o da própria matéria-prima original.

Entretanto, esses ácidos orgânicos e os traços de ácidos minerais que se formam, reagem com bases liberadas da matéria orgânica, gerando compostos de reação alcalina.

Durante o processo de compostagem nota-se a formação de ácidos húmicos que também reagem com os elementos químicos básicos, formando humatos alcalinos. Como consequência, o pH do composto se eleva à medida que o processo se desenvolve, passando pelo pH 7.0 e alcançando pH superior a 8,0, enquanto contiver nitrogênio amoniacal. (MARAGNO *et al.*, 2007).

Fernandes *et al.* (1999) afirmam que níveis de pH muito baixos ou muito altos reduzem ou até inibem a atividade microbiana e que quando são utilizadas misturas com pH próximo da neutralidade, o início da compostagem (fase mesófila) é

marcado por uma queda sensível de pH, variando de 5,5 a 6,0 , devido à produção de ácidos orgânicos.

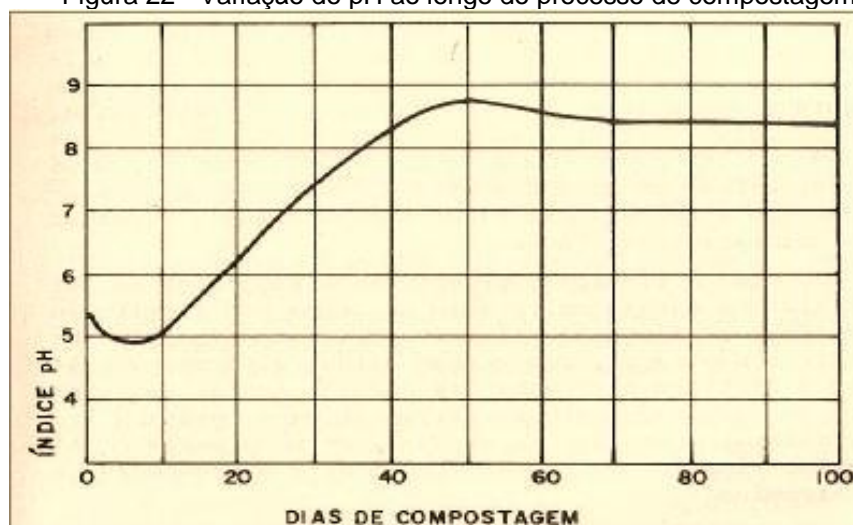
Quando a mistura apresentar pH próximo de 5,0 ou ligeiramente inferior há uma diminuição drástica da atividade microbiológica e o composto pode não passar para a fase termófila.

A passagem à fase termófila é acompanhada de rápida elevação do pH, que se explica pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia. Assim, normalmente o pH se mantém alcalino (7,5-9,0), durante a fase termófila.

De qualquer forma, e principalmente se a relação C/N da mistura for conveniente, o pH geralmente não é um fator crítico da compostagem. Como o pH dos lodos de esgotos sanitários geralmente é próximo de 7,0, o processo de compostagem normalmente se desenvolve muito bem com este material, mesmo quando misturado com bagaço de cana, resíduos de podas de árvores, cascas do processamento de algodão e outros. Segundo Haug (1993), à medida que os fungos e as bactérias digerem a matéria orgânica, são liberados ácidos que se acumulam e acidificam o meio. Este abaixamento do pH favorece o crescimento de fungos e a decomposição da celulose. Posteriormente estes ácidos são decompostos até serem completamente oxidados. No entanto, se existir escassez de oxigênio, o pH poderá descer a valores inferiores a 4,5 e limitar a atividade microbiana, retardando, assim, o processo de compostagem.

Na Figura 22 está apresentado, segundo Kiehl (1985) a variação do pH ao longo do processo de compostagem.

Figura 22 - Variação do pH ao longo do processo de compostagem.



Fonte: Kiehl, 1985.

Observa-se que durante as primeiras horas do processo o pH decresce até valores próximos a 5,0, aumentando, posteriormente, ao longo do processo, de forma gradual, alcançando valores próximos ao intervalo entre 8,0 - 9,0, ao final do período de compostagem. Em estudo realizado por Campos e Blundi (1999), os autores, ao monitorarem leiras de compostagem de resíduos sólidos domiciliares por um período de 127 dias, observaram que o pH inicial que era de 6,7 decresceu até o valor de 5,9 já no 7º dia, tendo evoluído até o pico de 8,4 no 42º dia e depois permanecido constante no valor de 8,3 até o final do estudo.

### **2.2.2 Características do composto orgânico**

Segundo Barreira (2005), mais recentemente, com o aumento populacional e a diversificação de indústrias, a geração de resíduos tornou-se mais constante e, conseqüentemente, tem-se empregado como matéria-prima para produção de compostos outros meios, como, por exemplo, os provenientes dos resíduos sólidos urbanos, lodos de esgoto, restos de indústrias alimentícias, resíduos da fabricação de papel e de agroindústrias.

Esses resíduos são considerados excelentes matérias-primas para a compostagem devido às suas composições químicas. Todavia, a preocupação quanto à utilização desses resíduos é que muitos desses materiais recebem tratamentos especiais na sua produção industrial nos quais são empregados produtos químicos considerados tóxicos, causando certa ressalva na recomendação de seu uso agrícola para fertilização (KIEHL, 1998).

Em relação à compostagem de resíduos sólidos orgânicos observa-se que ao final do processo são gerados dois importantes componentes: sais minerais, contendo nutrientes para as raízes das plantas e húmus, condicionador e melhorador das propriedades físicas, físico-químicas e biológicas do solo (KIEHL, 1998). Entende-se, portanto, que o benefício da matéria orgânica no solo não é apenas o de fornecedor de nutrientes para as plantas, mas principalmente de modificador, com o intuito de melhorar suas propriedades físicas e biológicas. (EMBRAPA, 2004).

De acordo com Kiehl (1998), a qualidade do composto pode ser analisada de acordo com as diferentes referências: a qualidade vista pelo produtor, a exigida pela

legislação e a vista pelo agricultor. Porém, em todas essas esferas, há, sem exceção, a preocupação comum no que diz respeito à umidade, à concentração de NPK e matéria orgânica e ao conteúdo de inertes (KIEHL, 2004).

Em relação à umidade, percebe-se que o composto não deve apresentar umidade superior a 60%, pois, assim, o comprador estaria comprando mais água que composto. Para Kiehl (1998), as concentrações de NPK e matéria orgânica são extremamente importantes para o valor do composto, à medida que representam também uma forma de se avaliar a sua qualidade e calcular seu valor de mercado comparando-se aos adubos químicos. O aspecto visual também desempenha papel importante para a comercialização do composto, levando-se em conta que a presença de inertes, tais como cacos de vidro, de louça, de plástico, entre outros, proporciona a sensação de um composto de má qualidade, dificultando a sua venda. Outras características do composto também são examinadas pelo agricultor, como a inexistência de odor, a coloração preta intensa e o tamanho das partículas (KIEHL, 1998, 2004).

Observa-se que o composto cru não possui as características necessárias requeridas a um composto orgânico para uma utilização segura no solo. Dentre as consequências da utilização de compostos imaturos no cultivo de plantas, Kiehl (1998) aponta a interferência na germinação das sementes e a possível toxicidade causada pelo excesso de amônia. O composto orgânico, quando bem processado, possui odor e coloração característicos, e tem seu manuseio, estocagem e transporte muito facilitados. Todavia, o composto cru não possui tais qualidades, podendo se tornar tóxico para as plantas (BARREIRA, 2005). No Quadro 6 estão apresentadas as principais diferenças entre os compostos estabilizado e não estabilizado.

Quadro 6 - Diferenças entre composto estabilizado e composto não estabilizado

<b>Composto estabilizado</b>	<b>Composto não estabilizado</b>
Nitrogênio como íon nitrato	Nitrogênio como íon amônio
Enxofre como íon sulfato	Enxofre ainda em parte como íon sulfídrico
Baixa demanda de oxigênio	Alta demanda de oxigênio
Sem perigo de putrefação	Perigo de putrefação
A mineralização é cerca de 50%	Altas concentrações de substâncias orgânicas não mineralizadas
Alta capacidade de retenção de água	Baixa capacidade de retenção de água

Fonte: Adaptado pelo autor de Barreira, 2005.

Segundo Lasaridi *et al.* (2006), a qualidade do composto orgânico depende de uma série de fatores, tais como tamanho de partículas, umidade, teor de matéria orgânica, teor de carbono, concentração de nitrogênio, fósforo e potássio, metais pesados, salinidade, porosidade, microrganismos patogênicos e grau de estabilidade do composto. capacidade de troca catiônica, capacidade de retenção de água, condutividade elétrica (CE) e substâncias húmicas.

### 2.2.3 Diferentes processos de compostagem

Os processos de compostagem são apresentados de diferentes formas, mas basicamente, têm sido classificados por diversos investigadores segundo três grandes características: disponibilidade de oxigênio (aeróbios e anaeróbios), temperatura (mesofílicos e termofílicos) e tecnologia adotada (abertos ou sistemas fechados). No Quadro 7 é apresentado as seguintes classificações dos processos de compostagem:

Quadro 7 - Classificações dos processos de compostagem

<b>Classificação quanto à Biologia:</b>	
Aeróbio	A compostagem aeróbia corresponde ao processo de compostagem na presença de oxigênio, sendo normalmente considerado que a taxa de arejamento necessária a manter um processo aeróbio é aquele que permite manter o nível de oxigênio disponível para os processos biológicos acima dos 5 %. Neste processo existe o desprendimento de CO <sub>2</sub> e vapor d'água, onde a temperatura é sempre elevada.
Anaeróbio	A digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos, tem sido designada de compostagem anaeróbia por alguns autores, consistindo no processo de degradação de matéria orgânica na ausência de oxigênio, caracterizada pela ocorrência de bio-transformações anaeróbias. É cada vez mais aceite a designação de fermentação anaeróbia para esta decomposição. Os principais argumentos a favor deste tipo de decomposição são a possibilidade de aproveitamento de parte do carbono sob a forma de metano (CH <sub>4</sub> ). Este gás pode ser aproveitado sob a forma de energia, elétrica ou vapor, de fácil utilização em instalações industriais. Neste processo a temperatura permanece baixa.
Misto	Processo onde a matéria passa pela fermentação aeróbia e depois existe uma redução de oxigênio desenvolvendo-se assim o processo anaeróbio.
<b>Classificação quanto à Temperatura</b>	
Criofílico	Processo onde a temperatura atinge uma média inferior, próxima à do ambiente.
Mesofílico	Processos biológicos envolvidos na compostagem classifica como mesofílicos os microrganismos que têm a capacidade de se desenvolver a temperaturas de 15 a 45°C . A temperatura nesses processos é diretamente proporcional a quantidade de microrganismos.

Termofílico	Processos biológicos envolvidos na compostagem classifica como termofílicos ao grupo de microrganismos que se desenvolvem a temperaturas entre os 45 e 65°C e que, se mostram incapazes de se desenvolverem a temperaturas inferiores a 40°C. É o mais indicado, pois, as altas temperaturas podem diminuir a sobrevivência de microrganismos patogênicos.
-------------	--

#### Classificação quanto ao ambiente

Aberto	Processo onde a compostagem ocorre em pátio a céu aberto.
Fechado	Processo onde a compostagem ocorre em digestores, bioestabilizadores, células de fermentação , etc.

#### Classificação quanto ao Processamento

Estático	Processo onde o revolvimento da massa em fermentação é feita com intervalos.
Dinâmico	Processo onde a massa em digestão é revolvida continuamente.

Fonte: Adaptado pelo autor de Mazzer *et al.*, (2004).

Para Fernandes *et al.* (1999), os processos de compostagem podem ser divididos em três grandes grupos:

- a) Sistema de leiras revolvidas (*windrow*), onde a mistura de resíduos é disposta em leira, sendo a aeração fornecida pelo revolvimento dos resíduos e pela convecção e difusão do ar na massa do composto. Uma variante deste sistema, além do revolvimento, utiliza a insuflação de ar sob pressão nas leiras
- b) Sistema de leiras estáticas aeradas (*static pile*), onde a mistura a ser compostada é colocada sobre uma tubulação perfurada que injeta ou aspira o ar na massa do composto, não havendo revolvimento mecânico das leiras.
- c) Sistemas fechados ou reatores biológicos (*In-vessel*), onde os resíduos são colocados dentro de sistemas fechados, que permitem o controle de todos os parâmetros do processo de compostagem.

Os dois primeiros sistemas geralmente são realizados ao ar livre, sendo em alguns casos realizados em áreas cobertas. A compostagem em reatores biológicos apresenta várias alternativas de reatores e níveis de automação.

##### 2.2.3.1.1 Sistema de leiras revolvidas (*windrow*)

Segundo Fernandes *et al.* (1999), dos três sistemas de compostagem apresentados, o de leiras revolvidas é o mais simples. A mistura dos resíduos a

serem compostados é disposta em longas leiras que são periodicamente revolvidas (Figura 23).

Figura 23 - Compostagem através do sistema de leiras revolvidas (*windrow*)



Fonte: <http://www.terafertil.com.br>

A aeração é feita pela difusão e convecção do ar na massa do composto. No momento em que é feito o revolvimento, o composto entra em contato com a atmosfera rica em  $O_2$ , o que permite suprir momentaneamente as necessidades de aeração do processo biológico. O efeito do revolvimento é limitado, pois alguns estudos mostraram que cerca de uma hora depois, o nível de oxigênio da leira se aproxima de zero.

Existem máquinas específicas para misturar e revolver o composto, como por exemplo: implementos tracionados por tratores agrícolas, sendo alguns já fabricados no Brasil; equipamentos auto-propelidos, que se deslocam sobre a leira de composto e realizam o revolvimento, deixando as leiras com dimensões padrão, fixadas pelo modelo do equipamento; pás carregadeiras convencionais, cuja eficiência é menor, porém podem ser usadas com bons resultados.

A altura e seção das leiras dependem do resíduo estruturante e do método de construção da leira, sendo que as de seção triangular, com 1,50m a 1,80m de altura e 4,0m a 4,5m de largura. O espaçamento entre as leiras deve ser determinado em

função das características do equipamento que fará o revolvimento. Caso seja uma Pá Carregadeira, um espaçamento de 3,0m geralmente é suficiente.

Durante a compostagem as leiras devem ser revolvidas no mínimo três vezes por semana (Kuter, 1995), sendo que esta operação tem por objetivos:

1. Aerar a massa de resíduos em compostagem;
2. Aumentar a porosidade do meio, que sofre uma compactação natural devido ao peso próprio;
3. Homogeneizar a mistura;
4. Expor as camadas externas às temperaturas mais elevadas do interior da leira, melhorando a eficiência da desinfecção;
5. Em alguns casos, reduzir a granulometria dos resíduos;
6. Diminuir o teor de umidade do composto.

O sistema de leiras revolvidas pode gerar alguns problemas de odor no início do processo, quando o lodo, mesmo estabilizado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), ainda apresenta mau cheiro. Porém, quando o processo de compostagem evolui satisfatoriamente, após 5 a 6 dias, o problema de odor praticamente desaparece (FERNANDES *et al.*, 1999).

#### *2.2.3.1.2 Sistema de leiras estáticas aeradas*

Neste sistema a mistura de resíduos é colocada sobre uma tubulação perfurada, conectada a um soprador industrial. A aeração necessária será fornecida por este sistema de injeção de ar sob pressão ou por sucção.

A Figura 24 exemplifica o sistema de compostagem com leiras estáticas aeradas nos Estados Unidos, onde este sistema é bastante utilizado e os sopradores mais empregados tem potência entre 1 e 5 HP, de acordo com as características e volume dos resíduos, sendo ligados e desligados de maneira intermitente, durante a fase de bioestabilização. Estes sopradores trabalham a pressões internas de 600 a 1.000 mm de coluna d'água.

Figura 24 - Compostagem através do sistema de leiras estáticas aeradas (*static pile*).



Fonte: <http://www.waternut.org/moodle>.

A aeração deve ser dimensionada de acordo com os objetivos visados:

- a) Satisfazer às demandas de oxigênio do processo de biodegradação aeróbia;
- b) Remover o excesso de umidade;
- c) Remover o excesso de calor para manter a temperatura em torno de 60°C.

De acordo com os objetivos fixados, as necessidades de aeração podem variar bastante. De acordo com a *United States Environmental Protection Agency - USEPA*, experimentos de compostagem de lodo de esgoto fresco, mostraram que para uma taxa de aeração elevada, próxima de 3,6 m<sup>3</sup>/min/t de matéria seca de composto, 20 minutos após a parada do soprador, a atmosfera interna da massa de resíduos apresentou condições anaeróbias. Os ciclos de funcionamento dos sopradores devem, portanto, levar em conta esta dinâmica do consumo de oxigênio.

Quanto ao sentido da aeração, injeção ou aspiração do ar, vários autores defendem o ponto de vista de que a aspiração diminui os caminhos preferenciais de passagem do ar na massa do composto, diminuindo, portanto, as microzonas de anaerobiose. A sucção do ar também tem a vantagem de permitir melhor controle de odores, pois o ar que percorre a massa do composto é captado pelas tubulações e pode passar posteriormente por um sistema de tratamento de odores (FERNANDES *et al.*, 1999).

Depois de formadas as leiras, também é importante recobri-las com uma camada de aproximadamente 5cm de resíduo estruturante ou de composto já curado. Esta prática visa:

- a) Proteger o composto do ressecamento superficial, o que impediria a atividade microbológica nesta região;
- b) Isolar a massa de resíduos de moscas, que são atraídas nos primeiros dias do processo;
- c) Isolar parcialmente os resíduos do meio externo, permitindo a elevação da temperatura na camada externa, o que contribui para melhorar a eficiência de remoção de patógenos.

No sistema de leiras aeradas, os sopradores devem funcionar durante toda a fase termófila (bioestabilização), que é a fase de maior demanda de oxigênio. Para o lodo de esgoto e resíduos estruturantes usuais, o período de aeração varia de 14 a 28 dias, sendo 21 dias a média mais comum.

Após a fase termófila o composto pode ser transportado para outro local, onde será realizada a maturação, que deve durar em torno de 60 dias. Nesta fase as necessidades de oxigenação são baixas e o composto pode ficar em leiras sem aeração, sendo revolvido a cada 20-25 dias.

Segundo Fernandes *et al.* (1999), este sistema de compostagem também permite a formação de leiras em duas configurações:

- a) Leiras isoladas, como as descritas para o sistema de leiras revolvidas
- b) Leiras agrupadas, onde a massa de resíduos é colocada em blocos compactos de grandes dimensões.

No primeiro caso é mais fácil gerir a evolução de lotes separados de composto, formando-se, por exemplo, uma leira por dia. No caso das leiras agrupadas, como os volumes de resíduos ficam armazenados em bloco, as produções de cada dia ficam dispostas umas sobre as outras, dificultando a gestão e o controle dos diferentes lotes. Este tipo de leira tem por outro lado, a vantagem de otimizar o uso do terreno, reduzindo as áreas necessárias.

#### 2.2.3.1.3 Sistema de reatores biológicos

A compostagem realizada em reatores biológicos (*In-Vessel*), oferece a possibilidade de maior controle sobre todos os parâmetros importantes para o

processo de compostagem, portanto, o ciclo da fase termófila é reduzido, o que em certos casos conferiu à compostagem em reator, a denominação de “compostagem acelerada”.

Devido à homogeneidade do meio, inclusive com relação à temperatura, a compostagem em reatores (Figura 25) também é tida como mais eficiente no controle dos patógenos. Outra característica desta alternativa é a maior facilidade para controlar odores, pois o sistema é fechado e a aeração controlada (FERNANDES *et al.*, 1999).

Figura 25 - Compostagem por meio dos sistemas fechados ou reatores biológicos (*In-  
vesse*).



Fonte: <http://www.epd.gov.hk>.

De acordo com as características dos resíduos e do tipo de equipamento, o tempo de detenção no reator biológico pode variar de 7 a 20 dias, o que faz com que o sistema demande menor espaço para sua implantação.

A aeração é feita sob pressão e como o sistema é fechado, também se torna mais fácil monitorar a taxa de aeração e adequá-la às necessidades do processo. No caso, pode ser medido o teor de oxigênio dos gases de saída do reator e quando a porcentagem de O<sub>2</sub> estiver próxima de 2%, aumenta-se a vazão de ar para impedir condições de anaerobiose.

Mesmo tendo uma fase termófila mais rápida e intensa, após seu final, o composto ainda deve passar por um período de maturação de mais ou menos 60 dias, tal como descrito para os sistemas anteriores, antes de ser utilizado.

Para Fernandes *et al.* (1999) a compostagem em reator é mais dependente de equipamentos mecânicos do que os sistemas de leiras revolvidas ou leiras estáticas aeradas, sendo que, sua sofisticação tecnológica é variável de acordo com o fabricante dos reatores e da escala da usina de compostagem.

De modo geral os vários tipos de reator se enquadram em três grandes categorias:

a) Reatores de fluxo vertical - São constituídos por sistemas parecidos com silos verticais onde os resíduos geralmente entram pela parte superior e percorrem o reator no sentido descendente. O ar pode ser injetado em vários níveis ou apenas na parte inferior do reator. O dimensionamento é feito de tal forma que quando o composto chega à parte inferior do reator, a fase termófila terminou. O composto então é descarregado e transportado ao pátio de maturação.

b) Reatores de fluxo horizontal - Apresentam geralmente forma cilíndrica e são dispostos horizontalmente. Por estas características às vezes são conhecidos como túneis. Os resíduos entram por uma extremidade do reator e saem pela outra, com tempo de detenção suficiente para a realização da fase termófila. O ar é injetado sob pressão ao longo do trajeto.

c) Reatores de batelada - Difere dos reatores anteriores pelo fato do composto ficar confinado no mesmo local, sem se deslocar. O reator geralmente é dotado de um sistema de agitação da massa de resíduos, que pode ser por rotação lenta do reator em torno de seu próprio eixo, ou por um sistema misturador interno. O revolvimento é necessário para limitar os caminhos preferenciais de passagem do ar, porém alguns modelos de reatores, por batelada, não são dotados deste dispositivo.

Nos dois primeiros casos, os resíduos passam pelos reatores em fluxo contínuo, sendo que o período de detenção é definido pela velocidade com que os resíduos percorrem o trajeto da entrada até a saída do reator. No terceiro caso, o reator, recebe uma determinada quantidade de resíduos, processa-os, e quando a fase termófila chega ao seu final, o reator é aberto, descarregado em batelada, recomeçando-se o processo com novos resíduos frescos.

### 2.2.3.1.4 Vantagens e desvantagens dos sistemas

Para se obter um composto com qualidade não se necessita necessariamente de tecnologia sofisticada para ser produzido. É necessário um bom controle sobre a qualidade dos resíduos que serão utilizados, a definição criteriosa das proporções de combinação dos resíduos, e bom monitoramento do processo biológico de compostagem, de acordo com os parâmetros.

Para Fernandes *et al.* (1999), com relação à tecnologia a ser utilizada, a escolha deve ser feita considerando-se critérios técnicos e econômicos além da análise das principais vantagens e desvantagens dos três sistemas (Quadro 8).

Quadro 8 - Principais vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de compostagem

<b>Sistema de compostagem</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Leiras revolvidas</b>	Baixo investimento inicial	Maior necessidade de área, pois as leiras tem que ter pequenas dimensões e há necessidade de espaço livre entre elas
	Flexibilidade de processar volumes variáveis de resíduos	
	Simplicidade de operação	
	Uso de equipamentos simples	Problema de odor mais difícil de ser controlado, principalmente no momento do revolvimento
	Produção de composto homogêneo e de boa qualidade	
	Possibilidade de rápida diminuição do teor de umidade das misturas devido ao revolvimento	Muito dependente do clima. Em períodos de chuva o revolvimento não pode ser feito O monitoramento da aeração deve ser mais cuidadoso para garantir a elevação da temperatura
<b>Sistema de compostagem</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Leiras estáticas aeradas</b>	Baixo investimento inicial	Necessidade de bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores durante a compostagem
	Melhor controle de odores	
	Fase de bioestabilização mais rápida que o sistema anterior	
	Possibilidade de controle da temperatura e da aeração	Operação também influenciada pelo clima
	Melhor uso da área disponível que no sistema anterior	

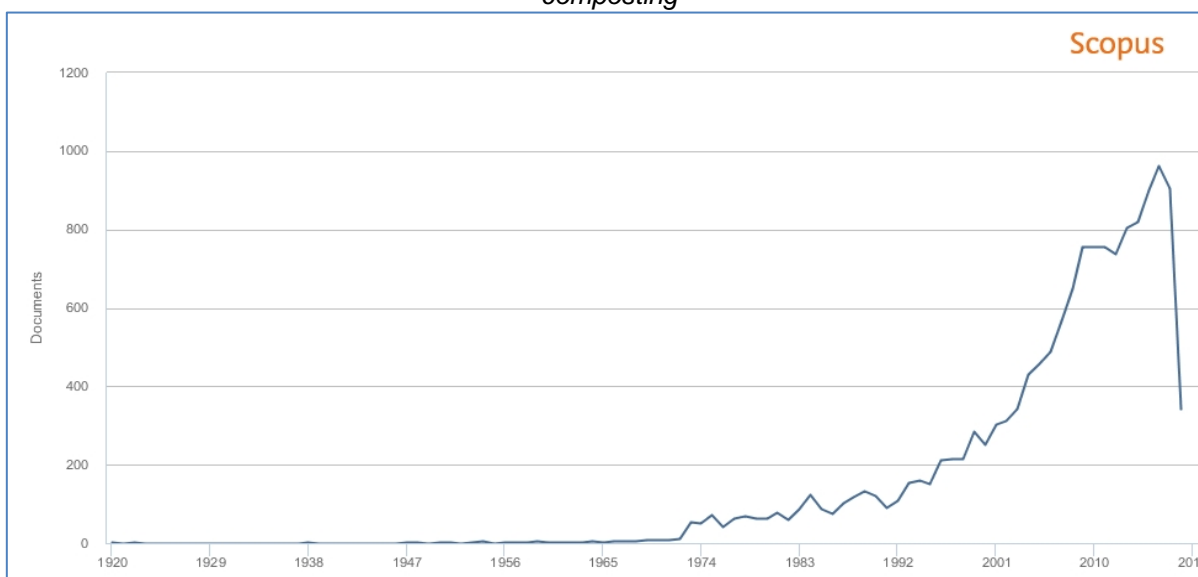
<b>Compostagem em reator</b>	Menor demanda de área	Maior investimento inicial
	Melhor controle do processo de compostagem	Dependência de sistemas mecânicos especializados, o que torna mais delicada e cara a manutenção
	Independência de agentes climáticos	
	Facilidade para controlar odores	Menor flexibilidade operacional para tratar volumes variáveis de resíduos
	Potencial para recuperação de energia térmica (dependendo do tipo de sistema)	Difícil de ser reparado se o sistema for mal dimensionado ou a tecnologia proposta for inadequada.

Fonte: Adaptado de Fernandes *et al.* (1999).

#### 2.2.4 Revisão Bibliométrica

Foi pesquisada neste eixo, a palavra-chave no idioma inglês “*composting*”, ou seja, compostagem, utilizando-se como campo de pesquisa “*Article title*” (título do artigo), “*Abstract*” (resumo) e “*Keywords*” (palavra-chave), selecionando-se apenas os documentos que foram intitulados de “*Article*” (artigo) sendo encontrados um total de 14.648 artigos que atingiram estes argumentos. Estes documentos foram publicados no período de 1920 a 2018, distribuídos ao longo da linha do tempo conforme mostra o Gráfico 21.

Gráfico 21 - Quantidade de artigos publicados de 1920 a 2018 utilizando o termo de pesquisa “*composting*”



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Verifica-se um crescimento das publicações a partir de 2001 até nossos dias, e os artigos encontrados com maiores números de citações, estão apresentados no Quadro 9:

Quadro 9 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo “composting”

	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de Public.	Periódico	Cit.
1	Evaluating toxicity of immature compost	Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoldi, M.	1981	BioCycle Volume 22 Edição 2 Páginas 54-57	658
2	A review of biodegradable polymers: Uses, current developments in the synthesis and characterization of biodegradable polyesters, blends of biodegradable polymers and recent advances in biodegradation studies	Amass, W., Amass, A., Tighe, B.	1999	Polymer International Volume 47, Edição 2, Outubro de 1998, Páginas 89-144	651
3	Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review	Bernal, M.P., Alburquerque, J.A., Moral, R.	2009	Bioresource Technology Volume 100, Edição 22, Novembro 2009, Páginas 5444-5453	619
4	An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales	Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C., Chambers, B.J.	2003	Science of the Total Environment Volume 311, Edições 1-3 , 20 de julho de 2003 , páginas 205-219	559
5	Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration	Van Ginkel, S., Sung, S., Lay, J.-J.	2001	Environmental Science and Technology Volume 35, Edição 24 , Páginas 4726-4730	533
6	Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes	Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A., Cegarra, J.	1998	Bioresource Technology Volume 63, Edição 1, Janeiro de 1998, Páginas 91-99	496
7	Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil	Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J.L.	2010	Environmental Pollution Volume 158, Edição 6, Junho de 2010, Páginas 2282-2287	435
8	Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall	Sharpley, A., Moyer, B.	2000	Journal of Environmental Quality Volume 29, Edição 5, Páginas 1462-1469	372
9	An overview on olive mill wastes and their valorisation methods	Roig, A., Cayuela, M.L., Sánchez-Monedero, M.A.	2006	Waste Management Volume 26, Edição 9, 2006 , Páginas 960-969	368

	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de Public.	Periódico	Cit.
10	Surface hydrophobin prevents immune recognition of airborne fungal spores	Aimanianda, V., Bayry, J., Bozza, S., (...), Romani, L., Latgé, J.-P.	2009	Nature Volume 460, Edição 7259, Páginas 1117-1121	362
11	Biological evaluation of compost maturity	Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A., De Bertoldi, M.	1981	BioCycle	347
12	Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures	Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., Bernal, M.P.	2001	Bioresource Technology Volume 78, Edição 3 , Julho de 2001 , Páginas 301-308	313
13	A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production	Van Der Bruggen, B., Vandecasteele, C., Van Gestel, T., Doyen, W., Leysen, R.	2003	Environmental Progress Volume 22 , Edição 1, Abril de 2003, Páginas 46-56	310
14	Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites	Ochi, S.	2008	Mechanics of Materials Volume 40, Edições 4-5 , abril - maio de 2008 , páginas 446-452	307
15	Effect of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass	BROOKES, P.C., McGRATH, S.P.	1984	Journal of Soil Science Volume 35 , Edição 2, Junho 1984, Páginas 341-346	304
16	The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend	Liang, C., Das, K.C., McClendon, R.W.	2003	Bioresource Technology Volume 86, Edição 2 , Janeiro de 2003 , Páginas 131-137	303
17	Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries	Kelessidis, A., Stasinakis, A.S.	2012	Waste Management Volume 32, Edição 6, Páginas 1186-1195	289
18	Municipal solid waste management in Indian cities - A review	Sharholy, M., Ahmad, K., Mahmood, G., Trivedi, R.C.	2008	Waste Management Volume 28, Edição 2 , 2008 , Páginas 459-467	281
19	Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust	Huang, G.F., Wong, J.W.C., Wu, Q.T., Nagar, B.B.	2004	Waste Management Volume 24, Edição 8 , 2004 , Páginas 805-813	269
20	Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil	Aggelides, S.M., Londra, P.A.	2000	Bioresource Technology Volume 71, Edição 3 , Fevereiro de 2000 , Páginas 253-259	255

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Zucconi *et al.* (1981) avaliaram a toxicidade do composto imaturo e também fez a avaliação biológica da maturidade do composto, verificando que as causas dos

baixos índices de germinação (fitotoxicidade) podem ser associadas à presença de metais pesados, elementos inorgânicos, sais solúveis além de compostos orgânicos. Estes compostos fitotóxicos podem ser produzidos durante o processo de compostagem como resultado de condições anaeróbias. Se essas características estão presentes no composto, a germinação de sementes diminuirá dependendo do grau de fitotoxicidade que possua a mistura. Nestes ensaios, utilizando o método de germinação de sementes foram utilizados para analisar o grau de maturação em que se encontra o composto. Para o autor, para ser considerado maduro, um composto precisa atender a alguns requisitos, e que índices de germinação acima de 50% sugerem que um composto está livre de fitotoxinas e sua aplicação não causará danos às plantas.

Amass *et al.* (1999) fizeram uma revisão de polímeros biodegradáveis: usos, desenvolvimentos atuais na síntese e caracterização de poliésteres biodegradáveis, misturas de polímeros biodegradáveis e avanços recentes em estudos de biodegradação, considerando os polímeros biodegradáveis em termos de relevância no gerenciamento atual de resíduos plásticos de materiais de embalagem, aplicações biomédicas e outros usos; documentos de pesquisa e patentes são catalogados. A pesquisa analisou misturas de dois e três componentes, como um método para reduzir os custos gerais e modificar as propriedades e as taxas de biodegradação dos materiais. As reações abióticas e bióticas foram discutidas, juntamente com o desenvolvimento de métodos de teste de biodegradação, particularmente no que diz respeito à compostagem.

A Produção de bio-hidrogênio em função da concentração de pH e substrato consiste na pesquisa de Van Ginkel *et al.* (2001), analisando se a conversão de orgânicos de águas residuais em gás hidrogênio poderia servir ao duplo papel da produção de energia renovável e redução de resíduos. A energia química em uma água residual sintética rica em sacarose foi recuperada como gás hidrogênio neste estudo. Utilizando experimentos fatoriais fracionários em lotes, foi testado o efeito da variação do pH e da concentração do substrato e ainda sua interação na produção de gás hidrogênio. Culturas bacterianas misturadas obtidas de uma pilha de composto, um campo de batata e um campo de soja.

O artigo de Bernal *et al.* (1998), é um clássico na análise de parâmetros de maturidade e estabilidade de compostos preparados com uma ampla gama de resíduos orgânicos

Sete composições diferentes foram preparadas em uma planta piloto pelo sistema de pilha estática de Rutgers, utilizando uma grande variedade de resíduos: lodo de esgoto, estrume de aves, lamas de suínos, águas residuais da cidade e o lignocelulósico de resíduos de algodão, palha de milho e bagaço de sorgo. Suas propriedades químicas e biológicas foram estudadas em quatro etapas do processo de compostagem: na mistura inicial, na fase termofílica, no final defase ativa e após dois meses de maturação. Não foram encontrados índices de maturação baseados na humificação da matéria orgânica e na capacidade de troca catiônica de diferentes compostos, uma vez que os valores para o composto maduro dependiam dos resíduos dos quais os compostos eram feitos.

Outro trabalho muito citado de Bernal *et al.* (2009), é uma revisão sobre a compostagem de esterco animal e critérios químicos para avaliação da maturidade do composto. Novos sistemas de produção pecuária, baseados na intensificação em grandes fazendas, produzem grande quantidade de adubos e lamas em terra agrícola suficiente para sua aplicação direta como fertilizantes. A compostagem é cada vez mais considerada uma boa maneira de reciclar o excedente de esterco como um produto final estabilizado e higienizado para a agricultura, e muitos trabalhos de pesquisa foram realizados na última década. No entanto, o composto de alta qualidade deve ser produzido para superar o custo de compostagem.

Os autores do trabalho, para fornecerem e revisarem as informações encontradas na literatura sobre compostagem de esterco, na primeira parte deste artigo explicam os conceitos básicos do processo de compostagem e como as características do esterco podem influenciar seu desempenho. Em seguida, é apresentado um resumo desses fatores, como perdas de nitrogênio (que reduzem diretamente o teor de nutrientes), humificação da matéria orgânica e maturidade do composto que afetam a qualidade dos compostos produzidos pela compostagem de esterco.

Ainda sobre a compostagem de resíduos animais, Huang *et al.* (2004) estudaram o efeito da relação C/N na compostagem de esterco de porco com serragem. O objetivo deste ensaio de compostagem foi avaliar o efeito da C/N no processo de compostagem de esterco de porco com o objetivo de reduzir a quantidade de serragem normalmente usada como materiais de compostagem. Duas estacas aeróbias estáticas foram preparadas consistindo de esterco de porco misturado com serragem a um C/N inicial de 30 (pilha A) e 15 (pilha B),

respectivamente. A pilha B, contendo maior quantidade de esterco de porco, apresentou um aumento mais lento da temperatura, temperatura máxima mais baixa e fase termofílica mais curta do que a pilha A. Também resultou em valores mais altos de pH e condutividade elétrica (CE), além de teores ainda maiores de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  e sólidos voláteis durante todo o período de compostagem.

Liang *et al.* (2003) estudaram a influência dos regimes de temperatura e conteúdo de umidade na atividade microbiana aeróbia de uma mistura de compostagem de bio sólidos. Para entender as relações entre temperatura, teor de umidade e atividade microbiana durante a compostagem de bio sólidos (lodo de tratamento de águas residuais municipais), experimentos de incubação bem controlados foram conduzidos usando um planejamento fatorial de dois fatores com seis temperaturas (22, 29, 36, 43, 50 e 57°C) e cinco conteúdos de umidade (30, 40, 50, 60 e 70%). A atividade microbiana foi medida como a taxa de captação de  $\text{O}_2$  ( $\text{mg/g}^{-1}$ ) usando um respirômetro controlado por computador. Neste estudo, o teor de umidade provou ser um fator dominante que afeta a atividade microbiana aeróbia da mistura de compostagem. Cinquenta por cento de teor de umidade pareceu ser o requisito mínimo para obter atividades maiores que  $1,0 \text{ mg/g}^{-1}$ . A temperatura também foi documentada como um fator importante para a compostagem de bio sólidos. No entanto, seu efeito foi menos influente que o teor de umidade.

A pesquisa de Nicholson *et al.* (2003) fez um inventário de insumos de metais pesados (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Cr, As e Hg) para solos agrícolas na Inglaterra e no País de Gales, apresentando um inventário de insumos em 2000, respondendo pelas principais fontes: deposição atmosférica, lodo de esgoto, adubos de gado, inorgânicos fertilizantes e cal, agroquímicos, água de irrigação, resíduos industriais e compostagem de subprodutos industriais. Em toda a área agrícola, a deposição atmosférica foi a principal fonte da maioria dos metais, variando de 25 a 85% do total de insumos. O esterco de gado e o lodo de esgoto também foram fontes importantes, responsáveis por aproximadamente 37 a 40 e 8 a 17% do total de insumos de Zn e Cu, respectivamente.

Brookes e Mcgrath (1984) também estudaram os efeitos da toxicidade do metal no tamanho da biomassa microbiana do solo. A quantidade de biomassa microbiana do solo foi medida pela técnica de fumigação (controle de pragas através do tratamento químico realizado com compostos químicos) com clorofórmio em solos agrícolas, previamente tratados com diferentes adubos orgânicos volumosos.

Já Beesley *et al.* (2010), estudaram os efeitos das alterações do biochar, ou seja, material rico em carbono obtido de biomassa carbonizada sob baixa atmosfera de oxigênio, para uso como condicionador de solos e do composto de resíduos verdes na mobilidade, biodisponibilidade e toxicidade de contaminantes inorgânicos e orgânicos em um solo poluído com vários elementos. Os resultados destacam o potencial do biochar para a remediação de terras contaminadas.

As formas de fósforo no esterco e adubo e sua liberação durante a chuva simulada foi objetivo da pesquisa de Sharpley e Moyer (2000). O grande acúmulo de P no esterco proveniente de operações de alimentação animal em áreas localizadas aumentou o potencial de exportação de P após a aplicação na terra. O comprometimento da qualidade da água doce pela eutrofização acelerada concentrou a atenção no gerenciamento de esterco e no potencial de perda de P no escoamento. Assim, a pesquisa investigou as quantidades e solubilidades relativas de P em adubos e seus compostos usando um fracionamento de Hedley modificado e liberação de P durante a precipitação simulada (70 mm/h<sup>-1</sup> por 30 min) em colunas de laboratório (15 cm de diâmetro).

Um estudo muito específico de compostagem, mas com 368 citações, é o trabalho de Roig *et al.* (2006), fazendo uma visão geral dos resíduos de azeitonas e seus métodos de valorização. Os resíduos de azeitonas representam um importante problema ambiental nas áreas do Mediterrâneo, onde são gerados em grandes quantidades e em curtos períodos de tempo. Suas altas concentrações de fenol, lipídios e ácidos orgânicos os transformam em materiais fitotóxicos, mas esses resíduos também contêm recursos valiosos, como uma grande proporção de matéria orgânica e uma ampla gama de nutrientes que podem ser reciclados. Neste artigo, foram revisadas pesquisas recentes para a valorização de resíduos de moinhos de azeitona realizadas por vários autores: segunda extração de óleo, combustão, gaseificação, digestão anaeróbia, compostagem e fermentação sólida são alguns dos métodos propostos.

Aimanianda *et al.* (2009) estudaram a contaminação biológica da compostagem, por meio da pesquisa sobre a hidrofobina de superfície, que impede o reconhecimento imune de esporos de fungos no ar. Sánchez-Monedero *et al.* (2001) na pesquisa intitulada “Transformação de nitrogênio durante a compostagem de resíduos orgânicos pelo sistema *Rutgers* e seus efeitos no pH, condutividade elétrica e maturidade das misturas de compostagem”, estudaram a evolução das

diferentes formas de nitrogênio durante a compostagem de diversos resíduos, bem como sua relação com o pH, condutividade elétrica e parâmetros de maturidade dos compostos obtidos.

Ochi (2008) no trabalho intitulado “Propriedades mecânicas de fibras kenaf e compósitos *kenaf*/PLA”, estudou o *kenaf* (*Hibiscus cannabinus*) que é uma planta anual de origem tropical, da família *Malvaceae*, com metabolismo fotossintético em C<sub>3</sub> que, nas latitudes temperadas, é cultivada como cultura de verão. Este artigo descreve o cultivo de kenaf e a aplicação em materiais compósitos biodegradáveis. Os materiais compósitos biodegradáveis unidirecionais foram feitos a partir de fibras kenaf e uma resina PLA do tipo emulsão. A análise térmica das fibras *kenaf* revelou que a resistência à tração das fibras *kenaf* diminuiu quando mantida a 180 ° C por 60 min. Resultados experimentais mostraram que o peso dos compósitos diminuiu 38% após quatro semanas de compostagem.

Van Der Bruggen *et al.* (2003) fizeram uma revisão dos processos de membrana acionados por pressão no tratamento de águas residuais e produção de água potável. Nos processos de membrana acionados por pressão (osmose reversa, nanofiltração, ultrafiltração e microfiltração), uma pressão exercida sobre a solução em um lado da membrana serve como força motriz para separá-la em um permeado e em um retentado.

Ainda com relação ao tratamento de águas residuárias, temos a pesquisa de Kelessidis e Stasinakis (2012), fazendo um estudo comparativo dos métodos utilizados no tratamento e disposição final do lodo de esgoto nos países europeus.

Na União Européia (UE), o gerenciamento de lodo continua sendo uma questão aberta e desafiadora para os Estados-Membros, pois a legislação europeia relativa é fragmentária e bastante antiga, enquanto os dados publicados sobre tratamento e descarte de lodo em diferentes países europeus costumam ser incompletos e não homogêneos. O principal objetivo do estudo foi delinear a situação atual e discutir perspectivas futuras para o tratamento e descarte de lodo nos países da UE.

O trabalho aponta que uma grande variedade de tecnologias de tratamento de lodo é usada nos países da UE, enquanto são observadas diferenças entre os Estados-Membros. A digestão anaeróbia e aeróbia parece ser o método de estabilização mais popular, aplicado em 24 e 20 países, respectivamente. A desidratação mecânica do lodo é preferida em comparação com o uso de leitos de

secagem, enquanto a secagem térmica é aplicada principalmente nos países da UE-15 (antigos Estados-Membros) e especialmente na Alemanha, Itália, França e Reino Unido. Em relação à disposição final do lodo, a reutilização de lodo (incluindo aplicação agrícola direta e compostagem) parece ser a escolha predominante para o gerenciamento de lodo na UE-15 (53% do lodo produzido), seguida pela incineração (21% do lodo produzido). Por outro lado, o método de descarte mais comum nos países da UE-12 (novos Estados-Membros que aderiram à UE após 2004) ainda é o aterro. Devido às obrigações estabelecidas na Diretiva 91/271/CE, é esperado um aumento temporário dos montantes de lodo que são descartados em aterros sanitários durante os anos seguintes nos países da UE-12.

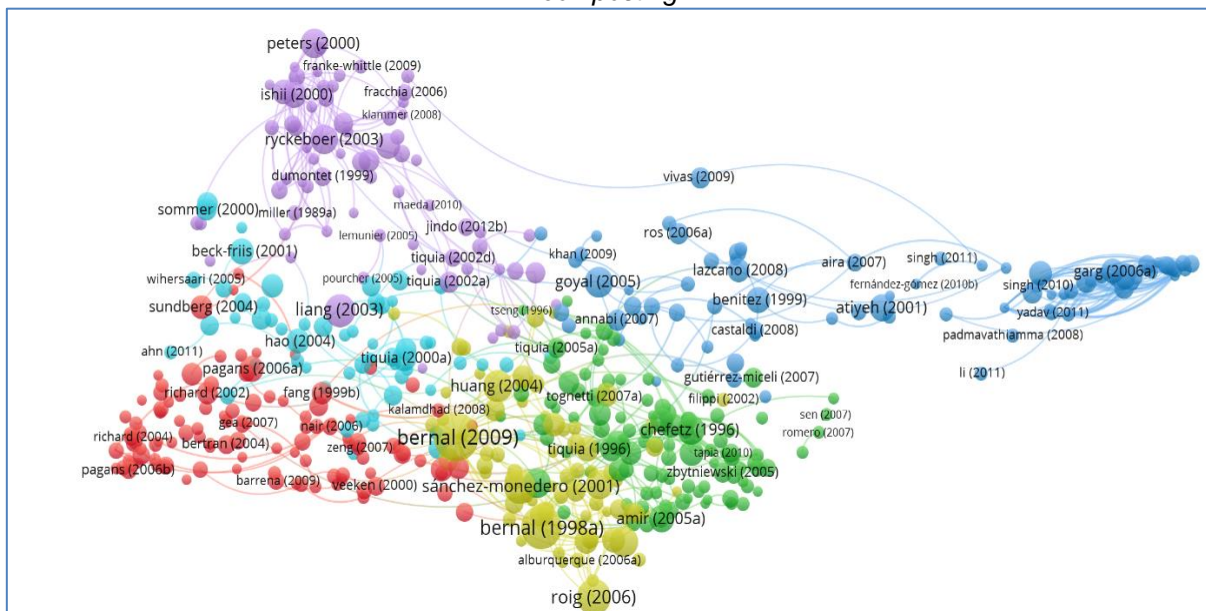
Concluem os autores que a reutilização de lodo na terra e na incineração de lodo parece ser as principais práticas adotadas na UE-27 (todos os Estados-Membros) até 2020. O reforço dessas práticas de descarte provavelmente resultará na adoção de tecnologias avançadas de tratamento de lodo, a fim de para alcançar maior remoção de patógenos, Também Aggelides e Londra (2000) estudaram os efeitos do composto produzido a partir de resíduos urbanos e lodo de esgoto nas propriedades físicas de um solo argiloso e argiloso. Adubo orgânico produzido por compostagem de 62% de resíduos urbanos, 21% de lodo de esgoto e 17% de serragem em volume foi aplicado nas taxas de 0 (controle), 75, 150 e 300 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> solos argilosos e argilosos, a fim de investigar seu potencial de melhoria do solo. Os experimentos foram realizados em áreas caracterizadas por clima semiárido.

Sharholly *et al.* (2008), fizeram um estudo mais amplo sobre o gerenciamento municipal de resíduos sólidos em cidades indianas, onde a compostagem também é objeto de estudo. A gestão municipal de resíduos sólidos é um dos principais problemas ambientais das cidades indianas. O gerenciamento inadequado de resíduos sólidos urbanos (RSU) causa riscos aos habitantes. Vários estudos revelam que cerca de 90% dos RSU são descartados de maneira não científica em lixões e aterros, criando problemas à saúde pública e ao meio ambiente. No presente estudo, foi feita uma tentativa de fornecer uma revisão abrangente das características, geração, coleta e transporte, descarte e tratamento de tecnologias de RSU praticadas na Índia.

Os autores encontrados nesta pesquisa bibliográfica, utilizando-se o termo “composting” tem grande número de citações, estão presentes em diversas redes de

relacionamento, como podemos verificar pela Figura 26, onde cada cor representa uma rede de relacionamento, além dos relacionamentos entre as próprias redes.

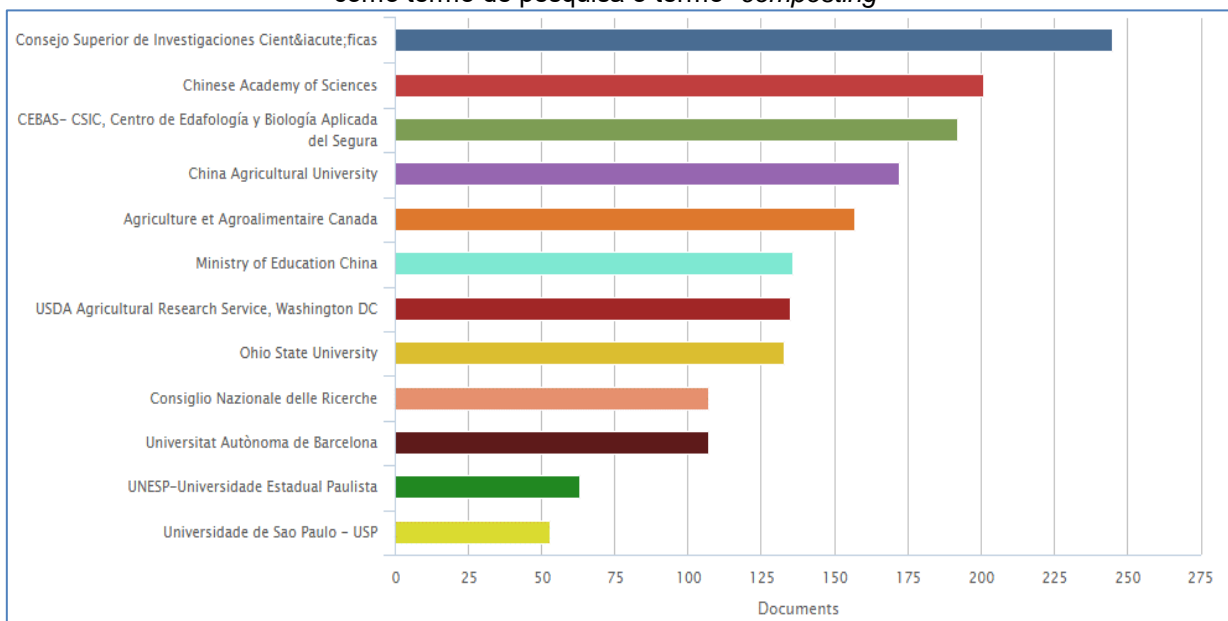
Figura 26 - Rede de relacionamento de artigos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo "composting"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus.

As instituições de ensino que mais produziram trabalhos sobre o tema compostagem, estão dispostos no Gráfico 22.

Gráfico 22 - Quantidade de artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo "composting"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus.

Observa-se um grande número de publicações espanholas, principalmente pelo *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, da Espanha, em Madrid e pelo

*Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS)*, da região de Murcia. As publicações chinesas, canadenses e americanas também estão presentes em grande número.

Na Tabela 9 estão elencadas as palavras-chave que mais foram encontradas nos artigos a partir do termo compostagem. Logicamente a palavra-chave mais encontrada foi “*composting*” em 71% dos artigos. Verifica-se já nesta busca a presença das palavras chaves “*sewage*” e “*sewage sludge*”, ou seja, pelo menos em 14% dos artigos de compostagem, o resíduo estudado foi o lodo de esgoto.

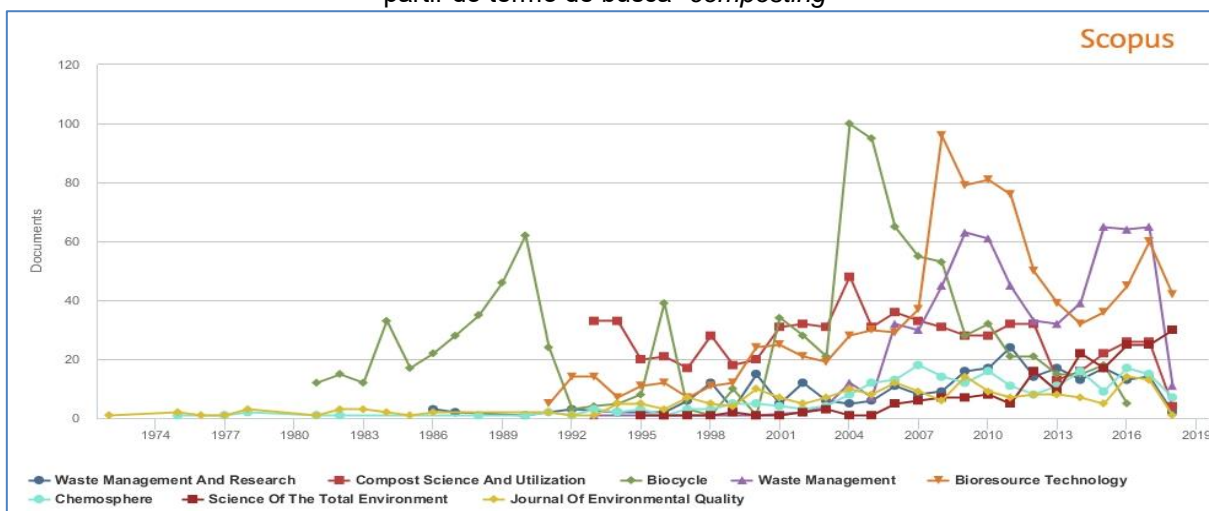
Tabela 9 - Palavras-chave com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando-se o termo “*composting*”

	Palavra-chave	Citações	%
1	Composting	10362	71%
2	Article	5158	35%
3	Compost	3835	26%
4	Soil	2592	18%
5	Priority Journal	2314	16%
6	Nonhuman	2229	15%
7	Waste Management	2098	14%
8	Biodegradation	1747	12%
9	Manure	1739	12%
10	Nitrogen	1687	12%
11	Controlled Study	1682	11%
12	Soils	1619	11%
13	Waste Treatment	1581	11%
14	Refuse Disposal	1449	10%
15	Waste Disposal	1426	10%
16	Sewage	1036	7%
17	Sewage Sludge	1003	7%

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Os periódicos que apresentaram maior quantidade de publicações sobre o tema da compostagem tiveram um pouco de variação. Conforme o Gráfico 23, identificamos no início dos anos 2000 uma grande quantidade de publicações da *Biocycle*, mas suas publicações sobre o tema hoje não são representativas, lugar ocupado hoje pelos periódicos *Bioresource Technology* e *Waste Management*.

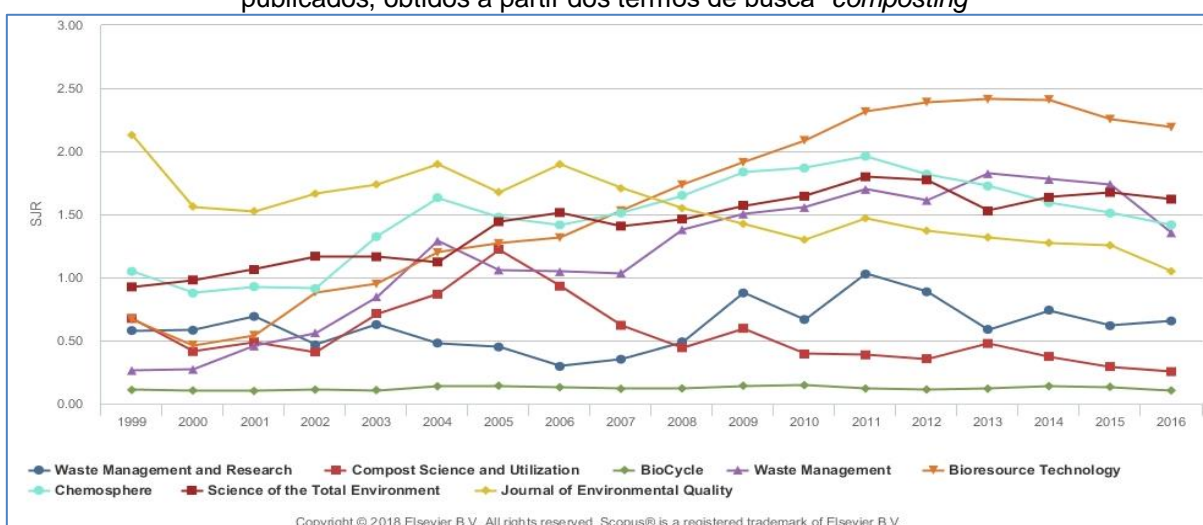
Gráfico 23 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir do termo de busca "composting"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus.

Também pode-se observar quais indicadores *SCImago Journal Rank* (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "composting, por meio do Gráfico 24.

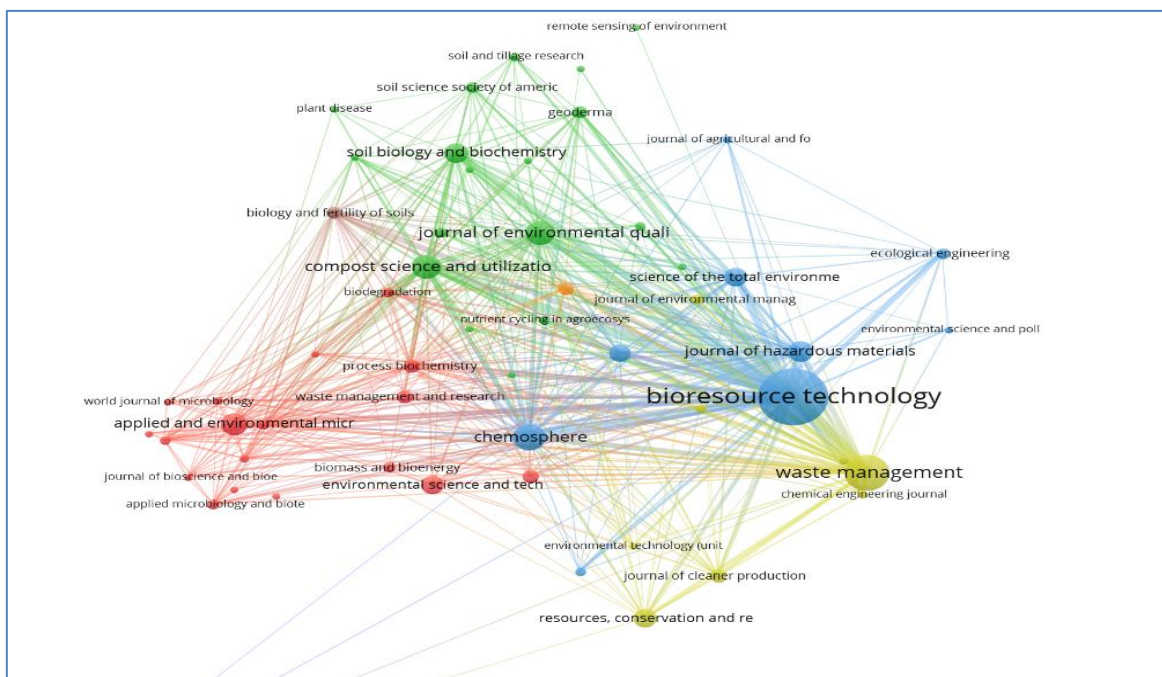
Gráfico 24 - Indicadores *SCImago Journal Rank* (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "composting"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus.

Neste item a *Bioresource Techonology* aparece com maior índice SJR, seguida pelo periódico *Science of the Total Environment*. Quando vemos a rede de relacionamentos, a partir do termo "composting", os periódicos que aparecem também com relevância são *Bioresource Techonology* e *Waste Management* (Figura 27).

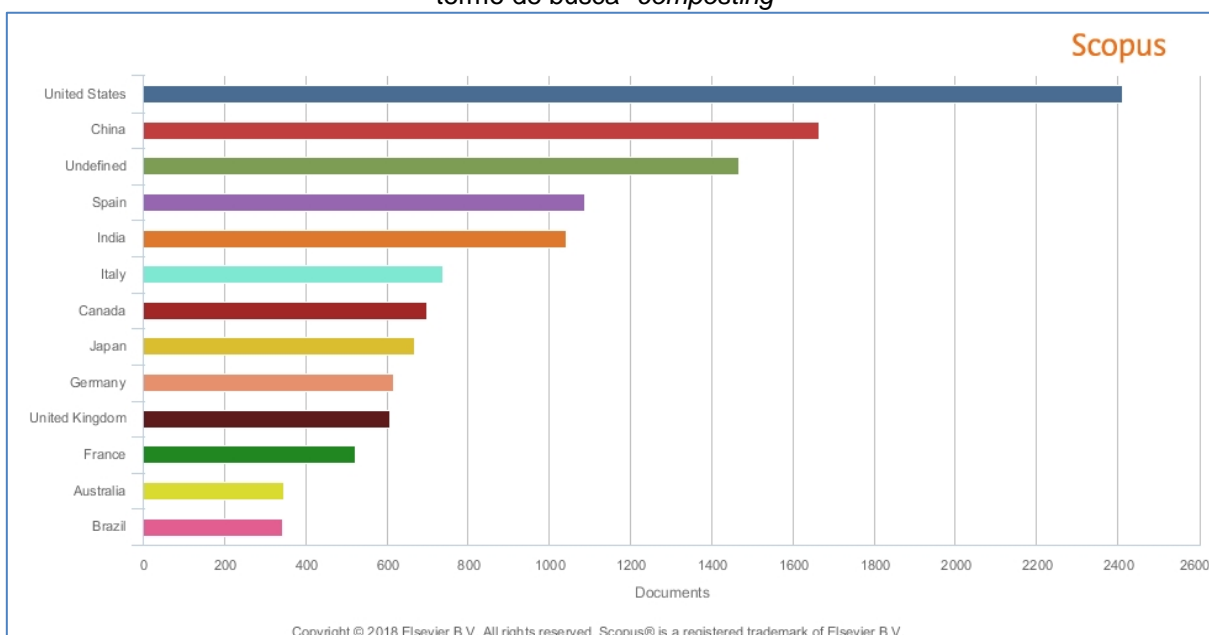
Figura 27 - Rede de periódicos com maior número de publicações de trabalhos obtidos a partir da busca do termo "composting"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

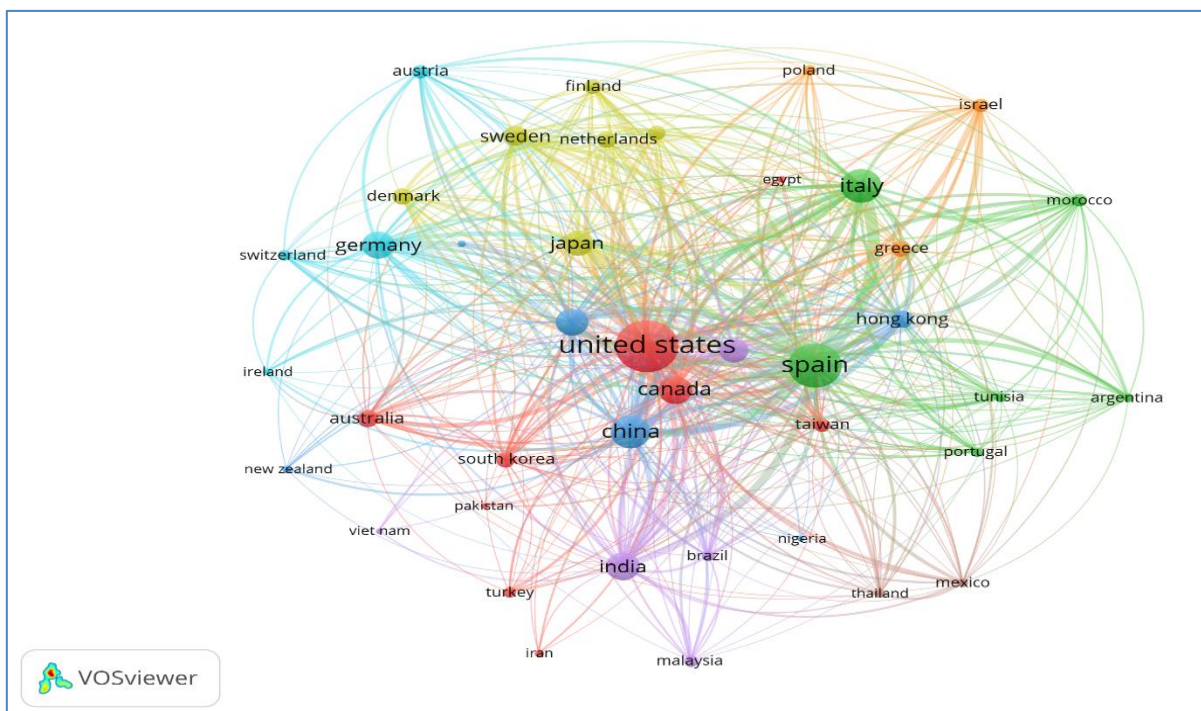
Dentre os países que mais tiveram publicações envolvendo o termo compostagem, destacam-se novamente Estados Unidos e China, vindo a seguir Espanha, Índia, Itália e Canadá. O Brasil aparece com cerca de 300 publicações nos periódicos pesquisados (Gráfico 25). Estados Unidos, China e Espanha também são os centros das redes de relacionamento sobre o assunto (Figura 28).

Gráfico 25 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir do termo de busca "*composting*"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

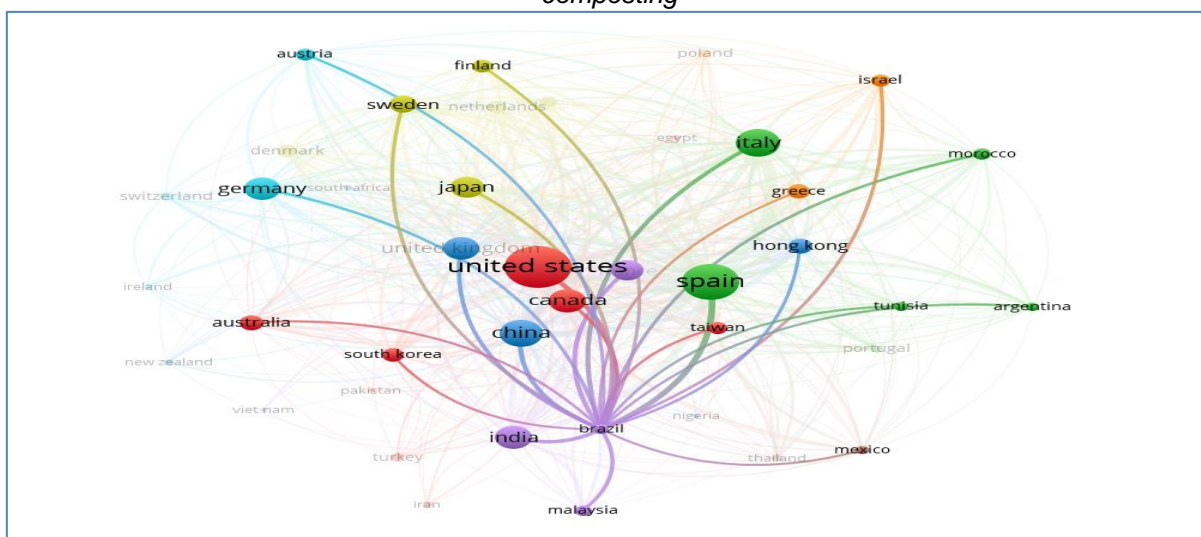
Figura 28 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "*composting*"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

São também destes países: Estados Unidos, China e Espanha os trabalhos com maior relacionamento com os trabalhos brasileiros, aparecendo ainda em destaque as pesquisas da Índia, Itália e Alemanha (Figura 29).

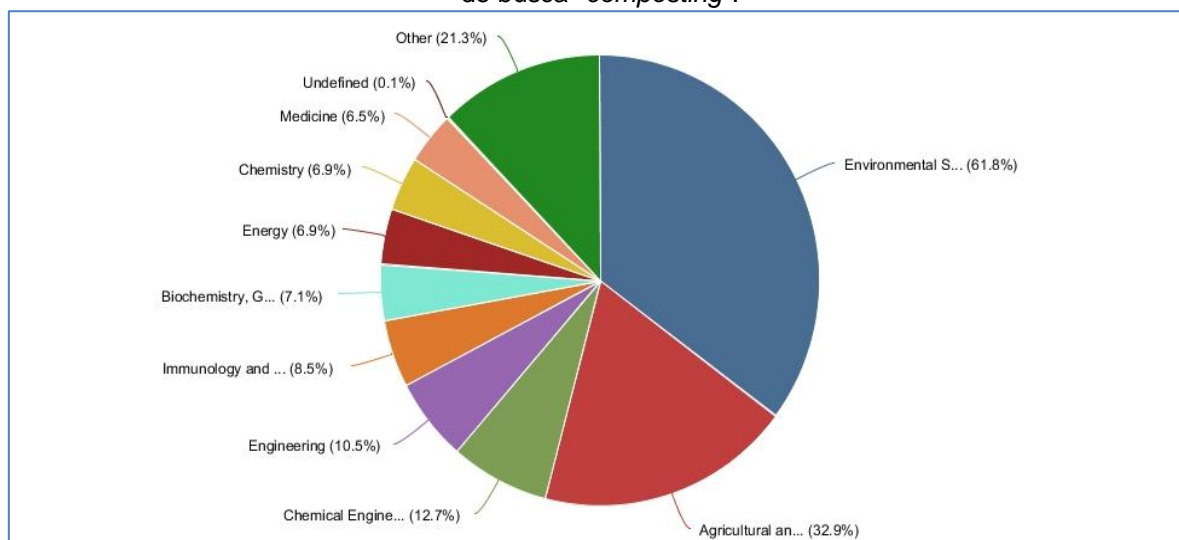
Figura 29 - Rede de relacionamento entre autores do Brasil com autores de outros países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "composting"



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

As áreas de conhecimento que abrangem o estudo da compostagem também são diversos, mas destacam-se o meio ambiente (61,8%) e a agricultura (32,9%), conforme o Gráfico 26.

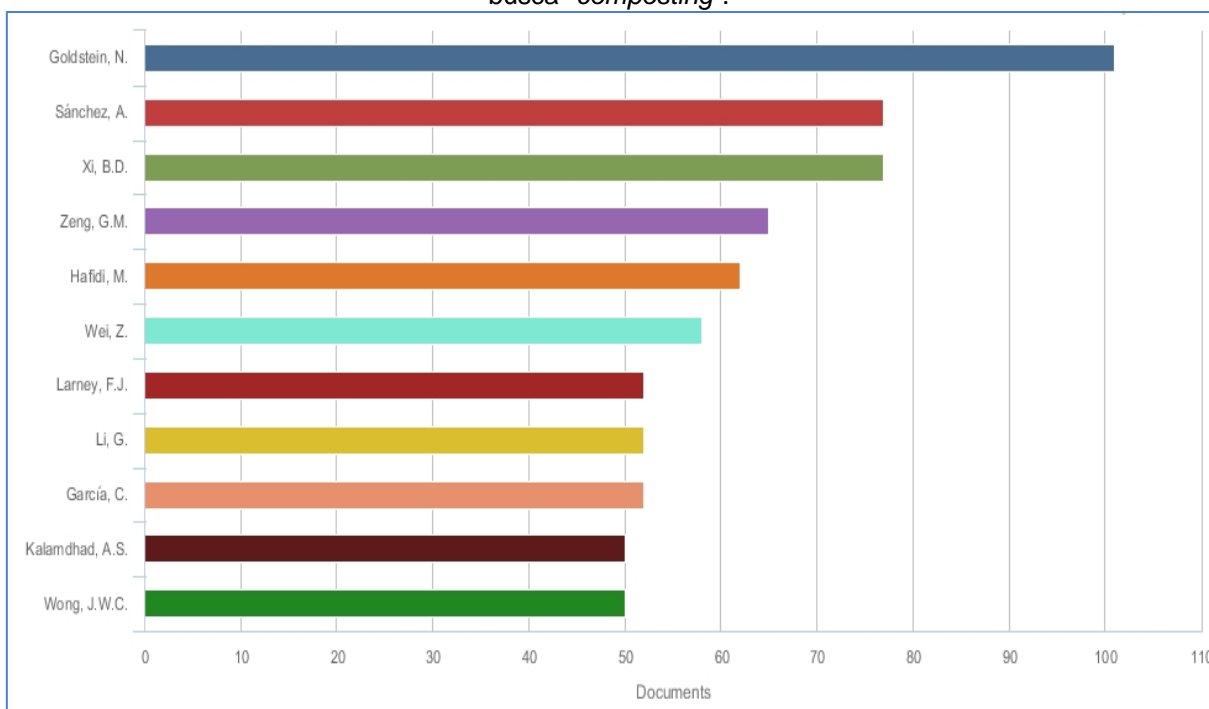
Gráfico 26 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca "composting".



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

O gráfico 27 apresenta os autores com maior quantidade de trabalhos publicados sobre o tema, com destaque para Goldstein, N com mais de 100 publicações e em sequência Sánchez, A e Xi, B.D. também com grande número de publicações.

Gráfico 27 - Autores com maior quantidade de publicações de artigos, obtidos a partir do termo de busca "composting".



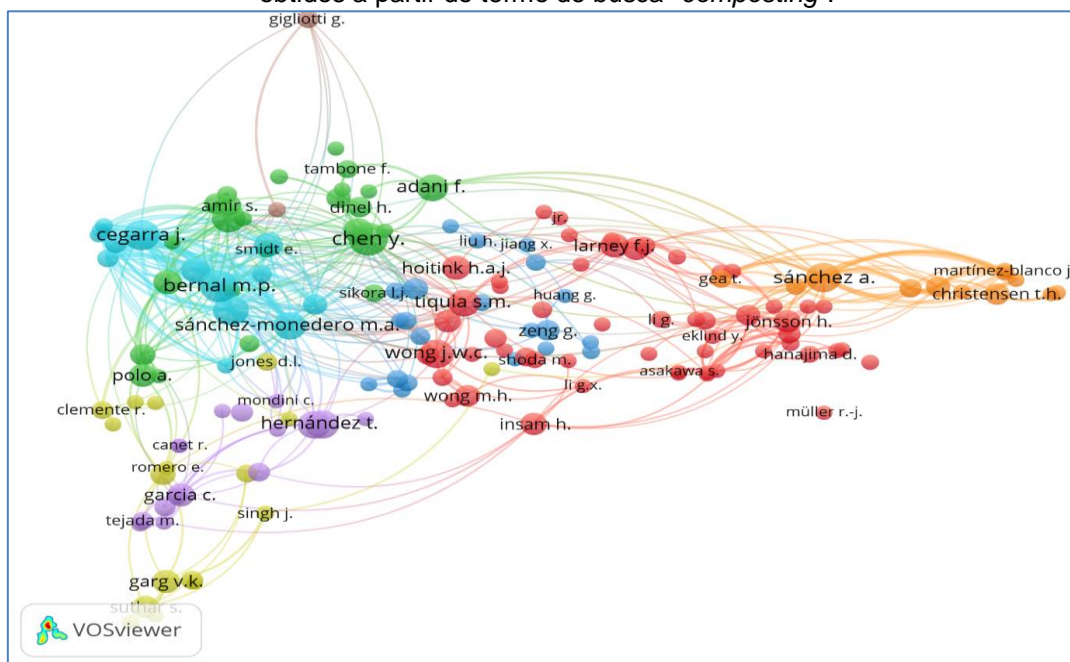
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Pode-se observar várias redes de autores que apresentaram maior quantidade de produção de artigos, obtidos a partir do termo de busca "composting".

Estas redes podem ser observadas pelas diferentes cores que compõe a rede total de relacionamento, observadas na Figura 30.

Chen, Y, Bernal, M.P. e Sánchez-Monedero, M.A., Hernandez, C e Garcia, C, aparecem em destaque no centro destas redes de relacionamento, o que os torna líderes na produção sobre o tema em suas regiões.

Figura 30 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca "composting".



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

## 2.3 LODO DE ESGOTO - REVISÃO CONCEITUAL E BIBLIOMÉTRICA

Segundo Agrawal (2007), o lodo de esgoto, também conhecido como bio sólido, é um subproduto de processos de tratamento de esgotos, cujas características dependem da qualidade dos esgotos e dos processos de tratamento a ele submetidos. Sua composição, em termos percentuais, apresenta as seguintes parcelas: 99,8% a 99,9% de água e 0,01 a 0,02% de sólidos, sendo que do total de sólidos, 70% são orgânicos e 30% inorgânicos, e após os processos de desidratação, chega a valores médios de 80% de umidade (Figuras 31 e 32).

Figura 31 - Lodo de esgoto com alta concentração de água

Figura 32 - Lodo de esgoto em processo de desidratação



Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Estudos da ABES (2019), mostram que a produção de lodo no Brasil está estimada em 200 mil toneladas por ano, devido aos baixos índices de coleta e tratamento de esgoto ainda existentes no país, mas que a pressão da sociedade por melhores condições ambientais, indica uma potencial tendência de ocorrer um incremento substancial na quantidade de lodo a ser disposto nos próximos anos, surgindo portanto a necessidade que sejam apresentadas técnicas que possibilitem um tratamento eficiente e adequado de lodos sanitários, obedecendo aos critérios de baixo custo e a facilidade de operação e manutenção, pois para Bettiol (2006), a disposição final do biossólido é uma etapa que gera muitos problemas para as estações de tratamento de esgotos, apresentado um custo de até 50% do orçamento operacional.

O lodo de esgoto apresenta uma composição muito variável, pois depende da origem do esgoto, bem como do processo de tratamento do esgoto e do seu caráter sazonal. Um lodo de esgoto típico apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo. Sendo rico em nutrientes orgânicos vegetais, o lodo de esgoto pode vir a substituir os fertilizantes, mas a disponibilidade de metais tóxicos, muitas vezes limita seu uso (BETTIOL, 2006).

Para Corrêa (2007), os problemas relacionados à saúde pública e a custos associados ao processamento e transporte de biossólidos são as questões que invariavelmente norteiam o aproveitamento desses resíduos. Ainda, segundo o autor, as questões sanitárias podem ser superadas por meio de manejo adequado do lodo fresco ou por meio de processos que o higienizem e o estabilizem

(compostagem, secagem com calor, calefação, insolação natural), convertendo-os, de fato, em biossólidos.

Para Maiorino *et al.* (2002), na Europa existe a tendência de abandonar o uso aterro sanitário como uma estratégia de eliminação de resíduos, que acabam não sendo reutilizados ou reciclados e que exigem muitas implementações de processos, necessidade de impermeabilização de longo prazo, com alto custo financeiro e a disponibilidade de terras adequadas..

Nesta perspectiva, estão ganhando de força as outras possibilidades de destinação, dentre elas a compostagem, onde o destino final do composto deve ser o setor agrícola, podendo ser beneficiado com a presença de lenta degradação de húmus, que viria a melhorar as características físicas do solo. Os potenciais benefícios inerentes à administração do composto no solo estão relacionadas com a redução, a fim de aumentar a permeabilidade da água do solo e do ar, retenção de água e nutrientes em solos arenosos e da concentração de nutrientes essenciais para o solo.

Para Chiba (2008) reciclagem do lodo de esgoto em solos agrícolas é uma das formas mais racionais de utilização desse material, sendo verificado em seus experimentos que sua aplicação do lodo de esgoto não causou efeitos deletérios na qualidade do solo, mesmo com sua reaplicação em anos sucessivos, em termos de contaminação com metais pesados, resultando ainda em aumento nos teores de Zn e Cu disponíveis no solo e que os teores de P, K, Ca, Mg, Cu e Zn nas plantas que receberam lodo de esgoto estavam em níveis adequados, e a utilização desse lodo não resultou em aumento nos teores de Cd, Cr, Ni e Pb no solo e na planta.

Quanto mais avançado e eficiente for o processo de tratamento de esgoto, maior será a quantidade de lodo produzido, que deve ser gerenciado e disposto adequadamente no meio ambiente, pois o mesmo recebe toda sorte de organismos, tais como vírus, bactérias, protozoários e helmintos. Como resultado, questões relacionadas à saúde pública invariavelmente confrontam o aproveitamento desses resíduos (CORRÊA, 2007).

Segundo a CETESB (1999), os lodos gerados em sistemas de tratamento de despejos industriais só serão considerados adequados para a aplicação no solo agrícola se a matéria orgânica presente no mesmo apresentar eficiência de biodegradação superior a 30%, determinada através do método respirométrico de

Bartha. Para a aplicação em áreas agrícolas, os lodos devem ser submetidos a processo de redução de patógenos e da atratividade de vetores.

Silva (2008) afirma que a compostagem aeróbia mostrou ser uma alternativa viável para desinfecção e estabilização de resíduos sólidos, fazendo-se necessário o estudo de diferentes configurações de reatores, para se extrair o máximo de eficiência do processo de compostagem aeróbia e, tornando-se de suma importância o desenvolvimento de novas pesquisas que enfoquem a compostagem com percentuais mais elevados de lodos sanitários em geral.

Segundo Moretti *et al.*, 2015, o uso dos lodos sanitários a partir de 2006 foi restringido pelo CONAMA (resolução 375) que especifica os limites máximos permitidos de metais pesados e patógenos, que proíbe o seu uso em hortaliças e tubérculos como medida de saúde. Classificando assim, o lodo como resíduo perigoso.

### **2.3.1 Tratamento de Efluentes e Destinação do Lodo**

De acordo com o Código de Águas, Decreto nº 24.643/34, seu art.109: “A ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízo de terceiros”. No artigo seguinte, o código estabelece:

Os trabalhos para a salubridade das águas serão executados à custa dos infratores, que, além da responsabilidade criminal, se houver, responderão pelas perdas e danos que causarem e pelas multas que lhes forem impostas nos regulamentos administrativos.

Na Resolução do CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 que em 13 de maio de 2011 foi alterada pelo CONAMA nº 430, e assegura a classificação dos corpos de água e as diretrizes ambientais para o seu enquadramento, estabelece os padrões e condições as condições e padrões de lançamento de efluentes, institui:

“Art. 12. O lançamento de efluentes em corpos de água, com exceção daqueles enquadrados na classe especial, não poderá exceder as condições e padrões de qualidade de água estabelecidos para as respectivas classes, nas condições de vazão de referência ou volume disponível, além de atender outras exigências aplicáveis.”

Também dispõe a responsabilidade das fontes poluidoras dos recursos hídricos pela realização do auto monitoramento para controle e acompanhamento periódico dos efluentes lançados nos corpos receptores, com base na amostragem representativa dos mesmos. Após a análise acima, é possível constatar que o ordenamento jurídico, com base no art. 3º, IV, Lei 6.938/81, não permite o lançamento de esgotos em cursos d'água sem prévio tratamento, e todo aquele (pessoa física ou jurídica) que descumprir o dever, de se enquadra na situação jurídica de poluidor, sujeito à sanções previstas em âmbito administrativo, cível e criminal, (art. 225, § 3º da CF/88).

Em relação a legislação estadual, a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), vinculado à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo regulamentou o uso agrícola dos lodos resultantes de estações de tratamento, incluindo o lodo de esgoto, através de um manual que dispõe parâmetros de tratamentos biológicos e despejos líquidos sanitários sejam tratados de forma adequada para a sua aplicação na agricultura, (Norma Técnica P4.230, 1999). Em 29, de agosto de 2006 a publicação CONAMA nº 375 definiu os critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento, e considera que:

“(...) A produção de lodos de esgoto é uma característica intrínseca dos processos de tratamento de esgotos e tende a um crescimento no mínimo proporcional ao crescimento da população humana e a solução para sua disposição é medida que se impõe com urgência.”

Com a publicação da norma CONAMA, os Estados podem elaborar ou continuar seguindo normas próprias. As normas estaduais podem ser mais restritivas que a norma federal, mas nunca mais permissivas.

### **2.3.2 Definição de Lodo de Esgoto**

Segundo METCALF e EDDY (2003) e MACKENZIE (2010), uma das definições de lodo de esgoto são os sólidos removidos do esgoto, durante o tratamento, o resultado da sedimentação dos sólidos em suspensão, como areia e microrganismos e é constituído por sólidos contaminantes concentrados e removidos

do esgoto, composta de matéria orgânica e inorgânica que fica acumulada no sistema de tratamento, estes sólidos são removidos periodicamente ou continuamente, depende do sistema adotado e após tratamento passam a ser denominados como biossólidos, que por sua vez, são resultados da degradação da matéria orgânica.

De modo geral todos os processos de tratamento de efluentes biológicos formam lodo. Esta produção é fundamental nos sistemas de tratamento na fase líquida. O esgoto bruto que é recebido em decantadores primários geram o lodo primário, composto por sólidos sedimentáveis do esgoto bruto. Pode exalar forte odor, principalmente se ficar retido durante muito tempo em condições de elevadas temperaturas (VON SPERLING, 2002).

Segundo o mesmo autor, por este motivo, a produção de lodos depende das características da água bruta, da dosagem dos produtos químicos e a eficiência do tratamento. É importante que haja a quantificação e o dimensionamento adequado da operação e dos sistemas que fazem o tratamento, as formas usadas para a desidratação e as formas de disposição deste resíduo.

O tratamento de efluentes visa a obtenção de lodo de qualidade para uma futura utilização, ou disposição com o mínimo de custo, uma vez que o lodo tem uma baixa concentração de sólidos (cerca de 2 a 3%). Agrega-se ao tratamento o peso da legislação, que cobra padrões de emissões de efluentes e disposição do lodo, o que faz com que a política de gerenciamento do lodo vise a redução de quantidade produzida, e opções alternativas no tratamento (SPINOSA, 2007).

Nos processos convencionais de tratamento de efluente os lodos gerados são classificados de acordo com a fase do tratamento em que foram originados. O lodo primário é originado no primeiro ciclo de tratamento, por sua vez, o volume de sólidos está na faixa de 1 à 6%, nesta fase o lodo é adensado para diminuir o seu volume, assim facilitando as fases posteriores de tratamento, e é feito de forma simples através de adensadores por gravidade, onde a partir de então atingem níveis altos de sólidos, podendo chegar a 10%. O lodo secundário, originado nos processos de conversão biológica por lodo ativado e separados no decantador para tratamento secundário, e seu adensamento é ainda mais fácil de ser realizado, por adensadores de flotação e pode-se agregar de 1 a 6% de sólidos nessa fase do tratamento (DAVIES, 2005).

### 2.3.3 Tratamento do Lodo de Esgoto

As características de instabilidade biológica, transmissão de patógenos e grandes volumes de sólido tem como objetivo no tratamento de efluente ser diminuída, e por final obter um produto mais estável e em menor volume, assim, reduz os custos nos processos que vem a seguir (PEDROZA *et al.*, 2010).

Os processos para tratamento do lodo na fase sólida segundo Davies (2005), que são utilizados mais frequentemente nas ETEs são:

a) Concentração do teor dos sólidos: adensamento por gravidade e por flotação;

b) Estabilização: biológico - digestão aeróbia e anaeróbia. Químico - adição de cal.

c) Condicionamento para desidratação: químico: adição de cal, cloreto férrico ou polímeros.

d) Processos de desidratação: leitos de secagem ou lagoas de lodo e desidratação mecanizada com filtros prensas, centrífugas e filtros prensa de esteira.

e) Processos térmicos de secagem de lodo: incineração, secagem térmica.

Segundo Miki *et al.* (2006) o adensamento tem por objetivo aumentar a concentração de sólidos no lodo, desta forma reduz a capacidade volumétrica das unidades seguintes de tratamento, como volume de digestores e tamanho das bombas, além disso a redução do uso de produtos químicos no desaguamento e o menor consumo de energia no aquecimento dos digestores. Pode aumentar a concentração de sólidos no lodo primário em até 12% aproximadamente (BITTON, 2001).

A secagem térmica é bastante adotada pelo fato de reduzir a quantidade de água presente na massa de lodo, com o propósito de diminuir o custo de transporte do material. Com a secagem térmica é possível obter sólidos na ordem de 95%, assim reduzindo consideravelmente a massa final de lodos (DAVIES, 2005).

### 2.3.4 Biodigestão e Estabilização do Lodo de Esgoto

A degradação pode ocorrer em meio aeróbio e anaeróbio, sendo que no primeiro caso, é uma solução mais utilizada nos países desenvolvidos, pois a

aeração requerida para fornecer oxigênio aos microrganismos aeróbios requer grandes quantidades de energia elétrica, além de produzir significativas quantidades de CO<sub>2</sub>. Em condições aeróbias a matéria orgânica é convertida a gás carbônico, água e biomassa e no processo de degradação anaeróbia, a matéria orgânica é transformada em gás carbônico, metano, água e biomassa, sendo que a produção de biomassa é significativamente menor quando comparada aos processos aeróbios pois a taxa de crescimento dos microrganismos anaeróbios é baixa (VON SPERLING, 2002).

Segundo Von Sperling (2002) o processo anaeróbio, resulta em baixa produção de lodo, cerca de 5 a 10 vezes inferior ao que ocorre nos processos aeróbios; não há consumo de energia elétrica, uma vez que dispensa o uso de bombas e aeradores; baixa demanda de área, reduzindo os custos de implantação; possibilidade de preservação da biomassa (colônia de bactérias anaeróbias), sem alimentação do reator, por vários meses, ou seja, a colônia de bactérias entra em um estágio de endogenia, sendo reativada a partir de novas contribuições, o que não acontece nos processos aeróbios, no qual as bactérias morrem e o sistema entra em colapso quando não há mais oxigenação.

Para que seja determinado o tipo adequado de biodigestor a ser utilizado, deverá analisar as condições do local, a disponibilidade do substrato, investimento envolvido, entre outros fatores. Porém, atendendo as especificações do projeto e realizando corretamente as instalações e operações, qualquer biodigestor pode produzir biogás, que permanece no próprio local da digestão, ou até mesmo em um gasômetro (COMASTRI FILHO, 1981).

Existem diversos modelos de biodigestores, no regime a batelada os rejeitos são inseridos no biodigestor e são mantidos pelo tempo necessário para fermentação anaeróbia (BONTURI e DIJK, 2012). Com o processo finalizado, o biodigestor é aberto, retiram-se os resíduos e é realizada uma limpeza para uma nova leva de substrato pode ser inserida (COMASTRI FILHO, 1981).

Segundo Junqueira (2014) é um sistema com pouca dificuldade operacional, sendo de simples utilização, mas, necessita de cargas únicas de alimentação e é geralmente utilizado em processos que exista uma certa periodicidade na produção de biomassa, em propriedades agrícolas é comum por conta da grande quantidade de esterco gerado pelos animais.

Os processos de estabilização do lodo de esgoto foram desenvolvidos com o objetivo de mineralizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, reduzindo os riscos de putrefação e diminuindo a concentração de organismos patogênicos (METCALF e EDDY, 2002).

Segundo David (2002), quando se opta por utilizar a estabilização química, ocorre a adição de produtos que inibem a atividade biológica e oxidam a matéria orgânica. São possíveis três tipos de estabilização química:

a) Estabilização alcalina: adição de bases, como cal, que elevam o pH para valores maiores que 12, destruindo grande parte dos patógenos, e diminuindo o odor.

b) Oxidação úmida: Realizado em reatores onde a temperatura se encontra entre 100° e 374°C, ponto crítico da água, onde é injetado oxigênio e transforma a matéria orgânica em dióxido de carbono, água, ácidos orgânicos, matéria mineral, reduzindo mais de 95% de sólidos voláteis, produzindo um lodo capaz de ser facilmente degradado na fase líquida e que deve retornar ao sistema de tratamento.

c) Pasteurização: Injeção de amônia anidra, elevando o pH a 11,5, reduzindo patógenos, e em seguida é feito a adição de ácido fosfórico, que causa uma reação exotérmica, neutralizando o meio e condicionando o lodo para o desaguamento.

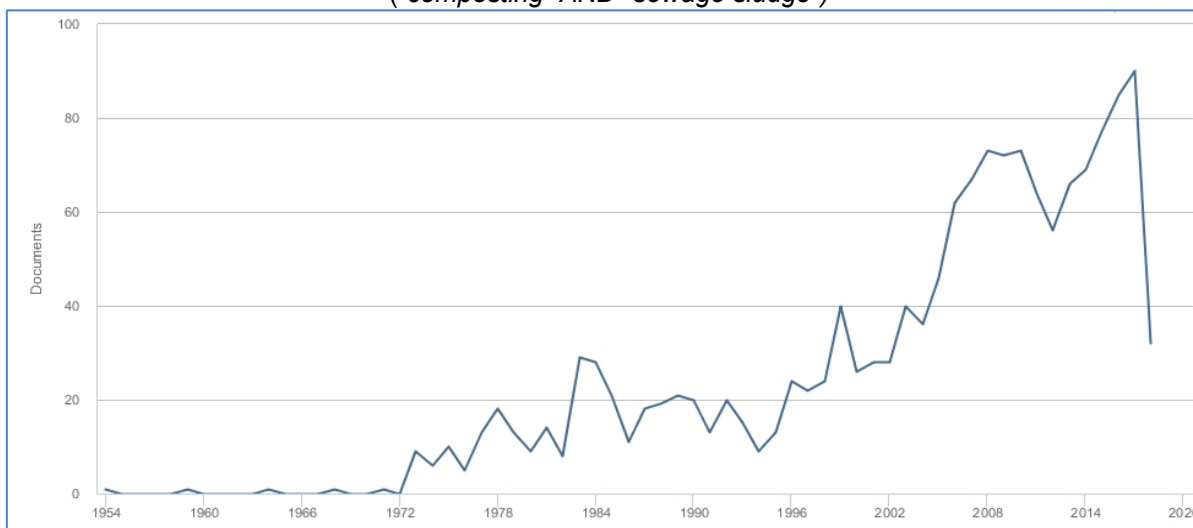
Esses processos eliminam termicamente os microrganismos patogênicos, porem possui pouca alteração na matéria orgânica presente (FERNANDES e SOUZA, 2001). Porém, é necessário empregar técnicas de desaguamento, ou secagem de lodo, visando reduzir o seu volume, através da redução da umidade, para diminuir o custo de transporte, como já foi citado anteriormente, e melhorar as condições de manejo desse lodo.

### **2.3.5 Revisão Bibliométrica**

Foi pesquisada neste eixo, a palavra-chave no idioma inglês ("*composting*" AND "*sewage sludge*"), ou seja, compostagem e lodo de esgoto, utilizando-se como campo de pesquisa "*Article title*" (título do artigo), "*Abstract*" (resumo) e "*Keywords*" (palavra-chave), selecionando-se apenas os documentos que foram intitulados de "*Article*" (artigo) sendo encontrados um total de 1.547 artigos que atingiram estes argumentos.

Os documentos foram publicados no período de 1954 a 2018, distribuídos ao longo da linha do tempo conforme a Gráfico 28.

Gráfico 28 - Quantidade de artigos publicados de 1954 a 2018 utilizando termo de pesquisa ("composting" AND "sewage sludge")



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus

Observamos no Gráfico 28 que o avanço nas publicações sobre o tema lodo de esgoto também ocorrem no final dos anos 1990 e começo dos anos 2000, provavelmente em função da grande quantidade produzida e a necessidade da escolha de melhores formas de tratamento e destinação.

No Quadro 10 encontramos os vinte trabalhos com mais citações a partir da pesquisa com o termo ("composting" AND "sewage sludge") sendo o artigo de Nicholson *et al.* (2003), "An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales" aquele que apresentou a maior quantidade de citações, com 558 no total.

Quadro 10 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo ("composting" AND "sewage sludge")

	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de Public.	Periódico	Cit.
1	An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales	Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C., Chambers, B.J.	2003	Science of the Total Environment Volume 311, Edições 1-3, 20 de julho de 2003 , páginas 205-219	558
2	Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes	Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A., Cegarra, J.	1998	Bioresource Technology Volume 63, Edição 1, Janeiro de 1998 , Páginas 91-99	496

	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de Public.	Periódico	Cit.
3	Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures	Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., Bernal, M.P.	2001	Bioresource Technology Volume 78, Edição 3, Julho de 2001 , Páginas 301-308	313
4	Effect of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass	Brookes, P.C., Mcgrath, S.P.	1984	Journal of Soil Science Volume 35, Edição 2, Junho 1984, Páginas 341-346	304
5	The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend	Liang, C., Das, K.C., McClendon, R.W.	2003	Bioresource Technology Volume 86, Edição 2, Janeiro de 2003, Páginas 131-137	303
6	Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries	Kelessidis, A., Stasinakis, A.S.	2012	Waste Management Volume 32, Edição 6, Páginas 1186-1195	289
7	Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil	Aggelides, S.M., Londra, P.A.	2000	Bioresource Technology Volume 71, Edição 3, Fevereiro de 2000, Páginas 253-259	255
8	Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties	Marinari, S., Masciandaro, G., Ceccanti, B., Grego, S.	2000	Bioresource Technology Volume 72, Edição 1, Março de 2000, Páginas 9-17	253
9	Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting	Namkoong, W., Hwang, Y., Park, S., Choi, J.-Y.	2002	Environmental Pollution Volume 119, Edição 1, Agosto de 2002, Páginas 23-31	245
10	Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composed sewage sludge	Sims, J.T., Kline, J.S.	1991	Journal of Environmental Quality Volume 20, Edição 2 Páginas 387 a 395	244
11	Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil	Bernal, M.P., Sánchez-Monedero, M.A., Paredes, C., Roig, A.	1998	Agriculture, Ecosystems and Environment Volume 69, Edição 3, 6 de julho de 1998, Páginas 175-189	235
12	Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with Eisena andrei: A pilot-scale study	Elvira, C., Sampedro, L., Benítez, E., Nogales, R.	1998	Bioresource Technology Volume 63, Edição 3, Março de 1998, Páginas 205-211	229
	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de Public.	Periódico	Cit.

13	Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge	Amir, S., Hafidi, M., Merlina, G., Revel, J.-C.	2005	Chemosphere Volume 59, Edição 6, Maio de 2005, Páginas 801-810	203
14	Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil	Albiach, R., Canet, R., Pomares, F., Ingelmo, F.	2000	Bioresource Technology Volume 75, Edição 1, Outubro de 2000, Páginas 43-48	192
15	Enzyme activities as indicators of the stabilization of sewage sludges composting with <i>Eisenia foetida</i>	Benitez, E., Nogales, R., Elvira, C., Masciandaro, G., Ceccanti, B.	1999	Bioresource Technology Volume 67, Edição 3, Março de 1999, Páginas 297-303	186
16	Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature	Pagans, E., Barrena, R., Font, X., Sánchez, A.	2006	Chemosphere Volume 62, Edição 9, Março de 2006, Páginas 1534-1542	184
17	Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids	Ndegwa, P.M., Thompson, S.A.	2001	Bioresource Technology Volume 76, Edição 2, Janeiro de 2001, Páginas 107-112	184
18	A simple respirometric technique for assessing compost stability	Lasaridi, K.E., Stentiford, E.I.	1998	Water Research Volume 32, Edição 12, Dezembro de 1998, Páginas 3717-3723	181
19	Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties	Epstein, E., Taylor, J.M., Chaney, R.L.	1976	Journal of Environmental Quality Volume 5, Edição 4 Outubro-dezembro de 1976, Páginas 422- 426	178
20	Vermicomposting of different types of waste using <i>Eisenia foetida</i> : A comparative study	Garg, P., Gupta, A., Satya, S.	2006	Bioresource Technology Volume 97, Edição 3, Fevereiro de 2006, Páginas 391-395	174

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma das primeiras pesquisas a discutir o lodo de esgoto foi a de Epstein *et al.* (1976), onde foram analisados os efeitos do lodo de esgoto e adubo de lodo aplicado ao solo em algumas propriedades físicas e químicas do solo, com 178 citações na *Scopus*.

Os efeitos de diferentes taxas de aplicação de lodo de esgoto e composto (0, 40, 80, 120 e 240 toneladas / ha) nas propriedades físicas e químicas do solo foram estudados em dois níveis de pH. As taxas de aplicação de lodo superiores a 120 toneladas/ha foram difíceis de aplicar e produziram um canteiro de pedras, enquanto a mesma taxa de composto foi facilmente aplicada e produziu um canteiro friável. O lodo e o composto aumentaram o teor de água e a retenção de água em um solo

argiloso. Tanto o lodo quanto o composto aumentaram os níveis de salinidade e cloreto do solo para um nível que pode afetar as plantas sensíveis ao sal.

Algumas pesquisas envolvendo o lodo de esgoto já foram discutidos no capítulo onde discutiu-se a compostagem, por ser tratar de estudos sobre a compostagem de lodo de esgoto, como em Nicholson *et al.* (2003) que fizeram um inventário de insumos de metais pesados para solos agrícolas na Inglaterra e no País de Gales, Bernal *et al.* (1998) analisando os parâmetros de maturidade e estabilidade de compostos preparados com uma ampla gama de resíduos orgânicos, Sánchez-Monedero *et al.* (2001) pesquisando a transformação de nitrogênio durante a compostagem de resíduos orgânicos pelo sistema *Rutgers* e seus efeitos no pH, CE e maturidade das misturas de compostagem, Brookes e Mcgrath (1984) pesquisa sobre o efeito da toxicidade do metal no tamanho da biomassa microbiana do solo, Liang *et al.* (2003), a influência dos regimes de temperatura e conteúdo de umidade na atividade microbiana aeróbia de uma mistura de compostagem de biossólidos, Kelessidis e Stasinakis (2012) por meio do estudo comparativo dos métodos utilizados no tratamento e disposição final do lodo de esgoto nos países europeus e ainda, Aggelides e Londra (2000), os efeitos do composto produzido a partir de resíduos urbanos e lodo de esgoto nas propriedades físicas de um solo argiloso e argiloso.

Porém outras pesquisas sobre o lodo de esgoto, que figuraram entre os vinte estudos mais citados da *Scopus*, não estão entre as mais citadas sobre compostagem, como a pesquisa de Marinari *et al.* (2000) que analisaram a influência de fertilizantes orgânicos e minerais nas propriedades físicas e biológicas do solo. O objetivo desta pesquisa foi estudar em um experimento de campo a influência de diferentes aplicações de fertilizantes nas propriedades biológicas e físicas do solo. Vermicomposto (VC) de lodo biológico, esterco lácteo estabilizado ou fertilizante nitrogenado mineral ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) foi aplicado a uma cultura de milho.

Elvira *et al.* (1998) estudaram a vermicompostagem de lodos de fábricas de papel misturado com esterco de gado em um experimento de seis meses. Estudou-se a vermicompostagem com *Eisenia andreide* em lodo de uma fábrica de papel. Inicialmente, em um experimento de laboratório em pequena escala foi realizado para determinar as taxas de crescimento e reprodução de minhocas nos diferentes substratos testados. No experimento em escala piloto, o número de minhocas aumentou entre 22 e 36 vezes e a biomassa total aumentou entre 2 e 2 e 3 e 9

vezes. Os vermicompostos eram ricos em nitrogênio e fósforo e apresentavam boa estrutura, baixos níveis de metais pesados, baixa condutividade, alto teor de ácido húmico e boa estabilidade e maturidade.

Também Garg *et al.* (2006) estudaram a vermicompostagem de diferentes tipos de resíduos usando *Eisenia foetida*, onde foi conduzido um estudo (duração de 100 dias) para avaliar a eficiência de uma espécie exótica de minhoca (epigênica - *Eisenia foetida*) na decomposição de diferentes tipos de substratos orgânicos (resíduos de cozinha, agro-resíduos, resíduos institucionais e industriais, incluindo lodo e fibras da indústria têxtil) e verificou-se que a porcentagem de nitrogênio, fósforo e potássio no vermicomposto aumentou enquanto o pH e o carbono orgânico total diminuíram em função do período de vermicompostagem. Os dados revelam que a vermicompostagem é uma tecnologia adequada para a decomposição de diferentes tipos de resíduos orgânicos (domésticos e industriais) em material de valor agregado.

Benitez *et al.* (1999), analisaram as atividades enzimáticas como indicadores da estabilização de lodos de esgoto compostados com *Eisenia foetida*. Foram estudadas a evolução da biomassa de minhocas e as mudanças nas atividades enzimáticas durante 18 semanas de vermicompostagem de lodo de esgoto.

Namkoong *et al.* (2002), estudaram a biorremediação de solo contaminado com diesel com compostagem, onde o principal objetivo foi encontrar a proporção de mistura apropriada de emendas orgânicas para melhorar a degradação do óleo diesel durante a compostagem do solo contaminado. Lodo de esgoto ou composto foi adicionado como uma emenda para suplementar matéria orgânica para compostagem de solo contaminado. As proporções de solo contaminado para alterações orgânicas foram de 1:0,1, 1:0,3, 1:0,5 e 1:1 como base de peso úmido. O contaminante alvo desta pesquisa foi o óleo diesel, que foi aumentado em 10.000 mg/kg de amostra com base no peso seco. A degradação do óleo diesel foi significativamente aprimorada pela adição dessas emendas orgânicas em relação ao solo reto.

Uma preocupação com o lodo de esgoto é a presença de metais pesados e sua contaminação do solo. Sims e Kline (1991) estudaram o fracionamento químico e absorção de plantas de metais pesados em solos alterados com lodo de esgoto co-compostado. Ainda sobre a presença de metais pesados no lodo de esgoto, Amir

*et al.* (2005) estudaram a extração sequencial de metais pesados durante a compostagem de lodo de esgoto.

A principal limitação da aplicação do solo no composto de lodo de esgoto é o teor total de metais pesados e sua biodisponibilidade no sistema solo-planta. Este estudo foi conduzido para determinar a especiação de metais pesados e a influência da alteração das propriedades físico-químicas do meio no decurso da compostagem nas concentrações, biodisponibilidade ou formas químicas de Cu, Zn, Pb e Ni no lodo de esgoto. As principais propriedades físicas e químicas e a caracterização espectroscópica do composto de lodo durante o tratamento mostram a estabilidade e a maturidade do produto final. O conteúdo total de metal no composto final foi muito inferior aos valores-limite dos compostos a serem usados como bom fertilizante no solo. Além disso, foi observado o uso de um procedimento de extração sequencial em composto de lodo em diferentes etapas do tratamento.

Bernal *et al.* (1998) também muito citado, estudaram a mineralização de carbono de resíduos orgânicos em diferentes estágios de compostagem durante a incubação com solo, onde analisou-se a decomposição de sete diferentes misturas de resíduos orgânicos preparadas com lodo de esgoto, adubo animal, lixo urbano e resíduos industriais e vegetais, durante a incubação aeróbia com o solo. A mineralização do carbono diminuiu com o aumento do tempo de compostagem.

Albiach *et al.* (2000), com 198 citações na *Scopus*, pesquisaram o conteúdo de biomassa microbiana e atividades enzimáticas após a aplicação de alterações orgânicas em um solo hortícola, os efeitos das taxas usuais ou recomendadas de aplicação de cinco emendas orgânicas (24 t/ha ano de composto de RSU, lodo de esgoto e esterco ovino, 2,4 t/ha ano de vermicomposto e 100l/ha ano de comercial) sobre o conteúdo de biomassa microbiana e o nível de atividades enzimáticas selecionadas (desidrogenase, fosfomonoesterase alcalina, fosfodiesterase, arilsulfatase, e urease) no solo, foram avaliados em um experimento de campo a longo prazo.

Quatro e cinco anos após o início das aplicações, nem o vermicomposto nem a solução de ácidos húmicos apresentaram efeito significativo, sugerindo que as taxas recomendadas pelos produtores e impostas por seus altos preços são muito baixas para serem úteis. Provavelmente, devido a taxas de aplicação mais realistas, os maiores valores de todos os parâmetros estudados foram encontrados quando resíduos orgânicos foram aplicados, efeitos atingindo significância estatística na

maioria dos casos. RSU composto era o produto obtendo-se maior realceatividade enzimática do solo, esterco ovino e lodo de esgoto, com resultados mais baixos, mas comparáveis. A maioria dos parâmetros estudados mostrou-se altamente correlacionada, indicando um aprimoramento equilibrado da atividade biológica do solo após a aplicação de resíduos orgânicos.

As emissões de amônia provenientes da compostagem de diferentes resíduos orgânicos e a dependência da temperatura do processo foram objetos de estudo de Pagans *et al.* (2006). As emissões de amônia foram quantificadas para a compostagem em escala laboratorial de três resíduos orgânicos típicos com teor médio de nitrogênio: fração orgânica de resíduos sólidos municipais, lodo bruto e lodo digerido anaerobicamente; e compostagem de dois resíduos com alto teor de nitrogênio: subprodutos animais de matadouros e cabelos parcialmente hidrolisados da indústria do couro. A amônia emitida na compostagem dos cinco resíduos investigados revelou uma forte dependência da temperatura, com um padrão distinto encontrado nas emissões de amônia para cada resíduo no primeiro estágio termofílico da compostagem (aumento exponencial da amônia emitida ao aumentar a temperatura) do que o mesofílico estágio final (aumento linear das emissões de amônia ao aumentar a temperatura).

A estabilidade é uma característica importante da qualidade do composto, mas também é difícil de medir. Lasaridi e Stentiford (1998) estudaram uma técnica respirométrica simples para avaliar a estabilidade do composto. Foi desenvolvida uma técnica respirométrica simples para a avaliação da estabilidade do composto (teste SOUR), que utiliza uma sonda de oxigênio dissolvido para medir mudanças na concentração de oxigênio em um extrato aquoso de composto, sob condições que garantam ótima atividade microbiana e taxas máximas de reação. Um procedimento totalmente automatizado é descrito e os possíveis problemas são discutidos. O método foi utilizado para acompanhar as mudanças na estabilidade dos compostos de lodo de esgoto de uma planta comercial usando o sistema de compostagem de leiras. Dois lotes diferentes de material foram monitorados.

Os resultados foram comparados com outros três testes de estabilidade, um método respirométrico utilizando amostras de composto sólido e a DQO e densidade óptica dos extratos de água do composto. Ambos os testes respiratórios indicaram aumento da estabilidade do composto com o tempo de processamento e apresentaram correlação significativa tanto com a idade do composto como entre si.



Também nesta pesquisa observa-se um grande número de publicações espanholas, principalmente pelo *Consejo Superior de Investigaciones Cientificas*, da Espanha, a *Chinese Academy of Sciences* e *O Harbin Institute of Technology* (ambos da China) e ainda o *Centre National de la Recherche Scientifique*, mais conhecido pela sigla CNRS (em português, 'Centro Nacional da Pesquisa Científica'), é o maior órgão público de pesquisa científica da França.

Destacamos no Brasil trabalhos publicados pela Universidade de São Paulo - USP (mais de 10 artigos) e a Universidade Estadual Paulista - Unesp (menos de 5 trabalhos).

Na Tabela 10 estão apresentadas as palavras-chaves que mais foram encontradas nos artigos a a partir da utilização do termo ("*composting*" AND "*sewage sludge*").

Tabela 10 - Palavras chaves com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando o termo ("*composting*" AND "*sewage sludge*")

	Palavra-chave	Citações	%
1	Composting	1185	77%
2	Sewage Sludge	1002	65%
3	Sludge	796	51%
4	Article	632	41%
5	Sewage	590	38%
6	Compost	431	28%
7	Soil	381	25%
8	Priority Journal	313	20%
9	Nonhuman	269	17%
10	Sewage Treatment	251	16%
11	Soils	230	15%
12	Organic Matter	216	14%
13	Nitrogen	213	14%
14	Controlled Study	187	12%
15	Heavy Metal	173	11%

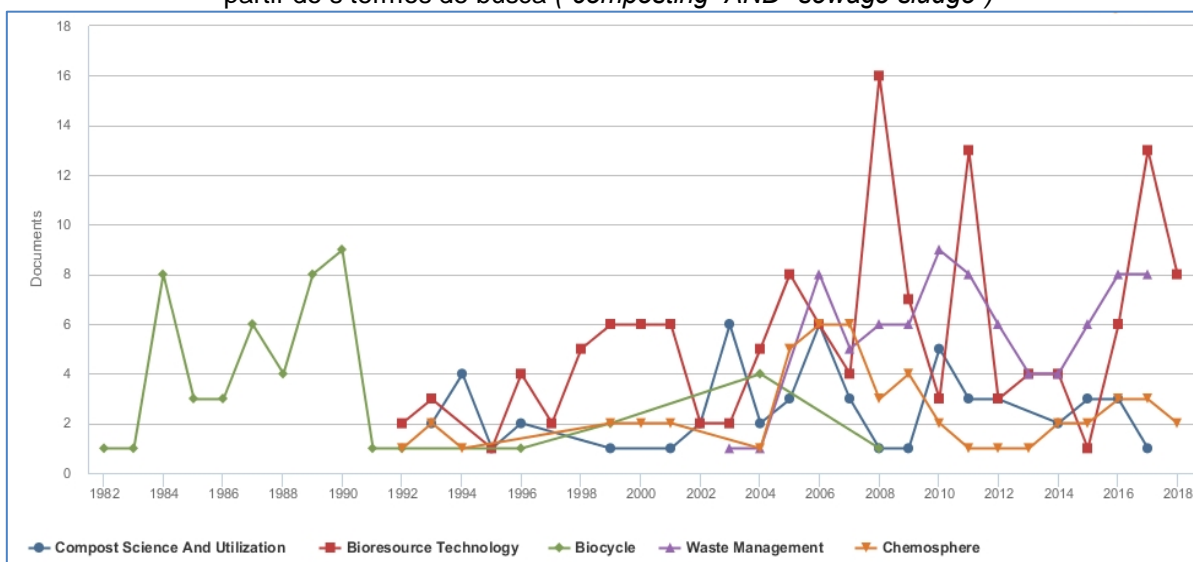
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

As palavras-chaves mais encontradas foram "*composting*" em 77% dos artigos e "*sewage sludge*" com 65% de incidência. Destaca-se ainda que em 11% incidem a palavra chave "*Heavy Metal*", metais pesados em português, demonstrando a preocupação dos autores com esta forma de contaminação.

Os periódicos que apresentaram maior quantidade de publicações sobre o tema ("*composting*" AND "*sewage sludge*") verificamos no Gráfico 30, e também

identificamos no início dos anos 2000 uma grande quantidade de publicações, com destaque para os periódicos *Bioresource Technology* e *Waste Management*.

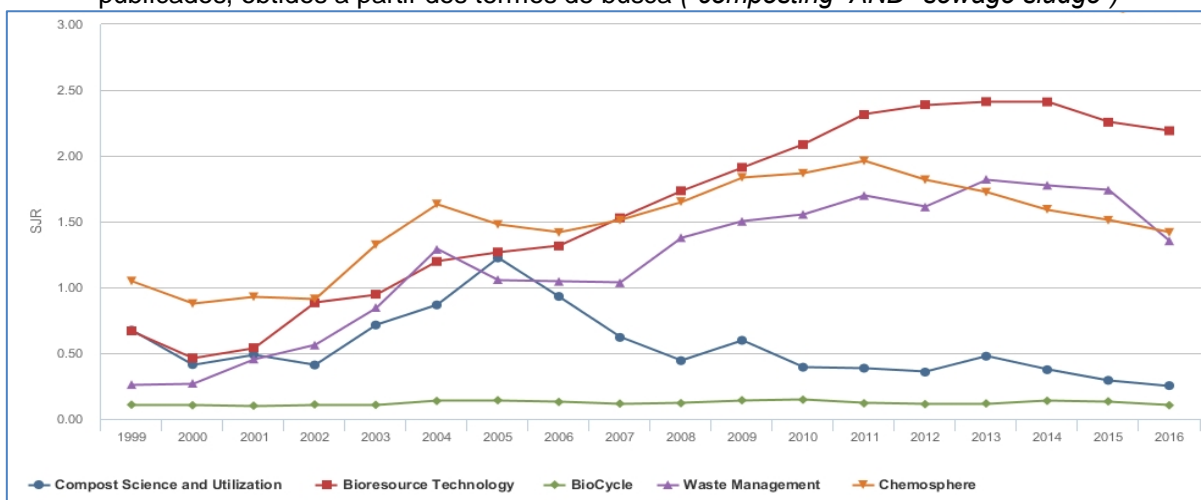
Gráfico 30 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("composting" AND "sewage sludge")



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Também podemos observar quais indicadores *SCImago Journal Rank* (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca "composting, por meio do Gráfico 31.

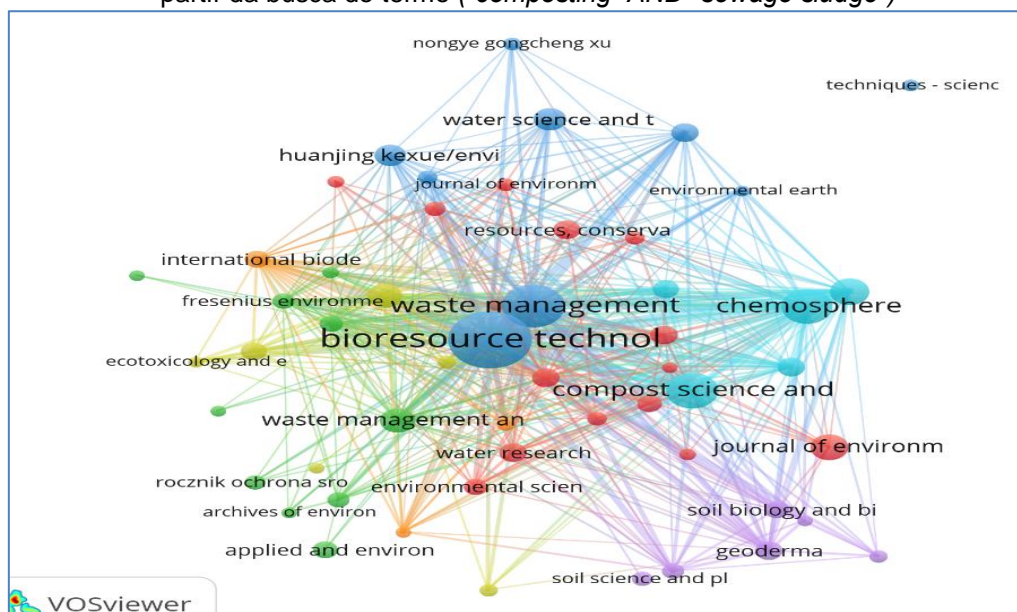
Gráfico 31 - Indicadores *SCImago Journal Rank* (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("composting" AND "sewage sludge")



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Também neste item a *Bioresource Technology* aparece com maior índice SJR, seguida pelo periódico *Science of the Total Environment*. Quando vemos a rede de relacionamentos, a partir do termo "composting", os periódicos que aparecem também com relevância são *Bioresource Technology* e *Waste Management* (Figura 34).

Figura 34 - Rede de periódicos com maior número de citações de trabalhos obtidos a partir da busca do termo ("composting" AND "sewage sludge")

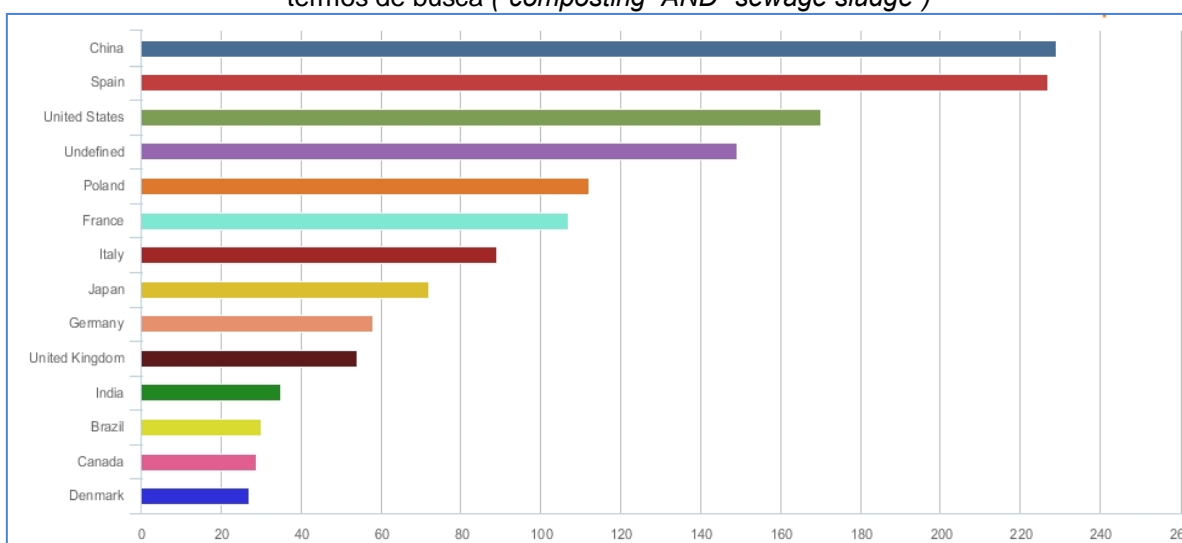


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus.

Também se observa em destaque o periódico *Chemosphere*, um periódico multidisciplinar que oferece disseminação de investigações relacionadas a todos os aspectos da ciência e engenharia ambiental.

Dentre os países que mais tiveram publicações envolvendo o termo compostagem e lodo de esgoto a China aparece com maior número de trabalhos, e aparece com praticamente a mesma quantidade a Espanha (cerca de 220 artigos), e em terceiro os Estados Unidos. Índia, Brasil, Canadá e Dinamarca aparecem com cerca de 20 publicações nos periódicos pesquisados (Gráfico 32).

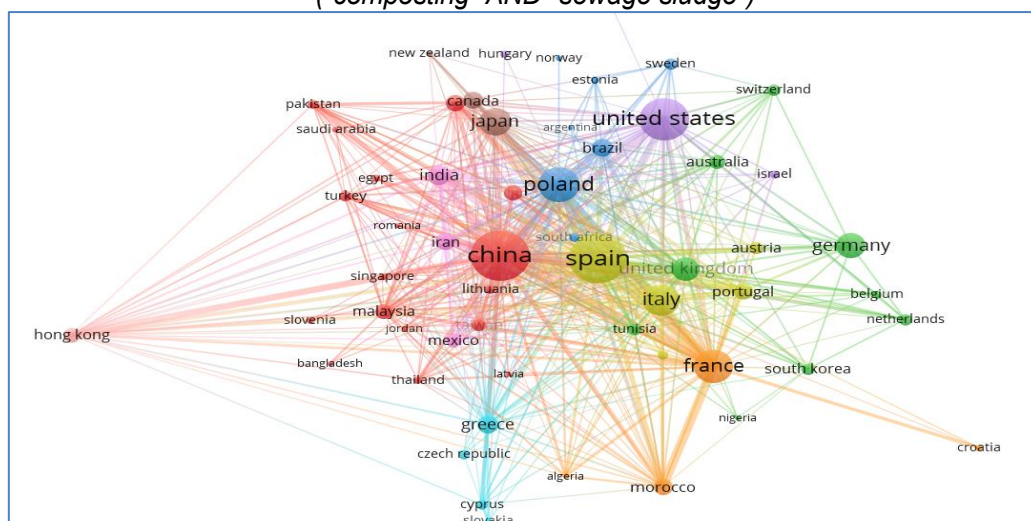
Gráfico 32 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("composting" AND "sewage sludge")



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus

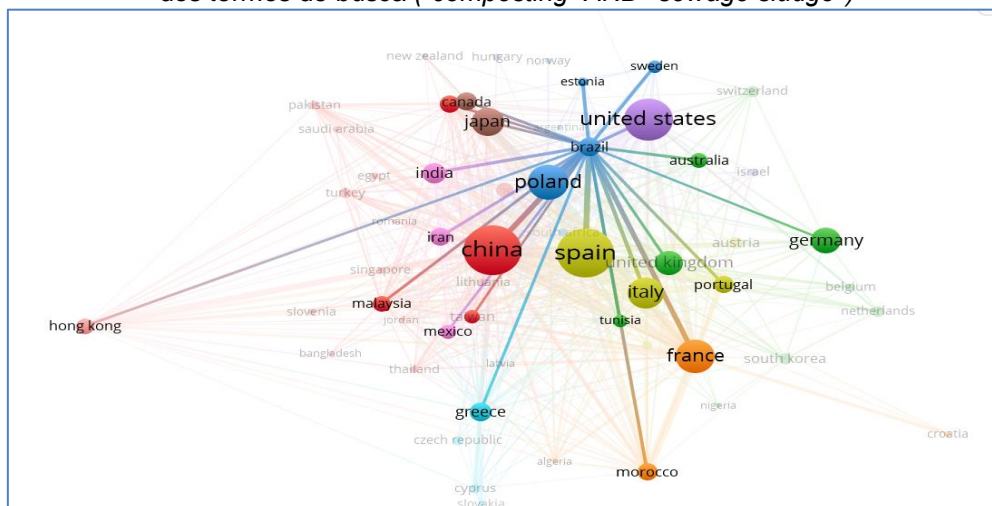
Com relação as redes relacionamento dos autores, a Figura 35 demonstra a rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (*"composting" AND "sewage sludge"*) onde por meio das cores é possível encontrar alguns centros de relacionamento, como a os principais sendo a China, Espanha, Estados Unidos e alguns secundários, como Itália, Alemanha, França, Polônia, Canadá e Japão. A rede de relacionamento entre autores do Brasil com autores de outros países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir destes mesmos termos é a mesma citada entre os diversos países, e podemos acrescentar ainda Portugal, Marrocos, Grécia, Suécia e Reino Unido (Figura 36).

Figura 35 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (*"composting" AND "sewage sludge"*)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus.

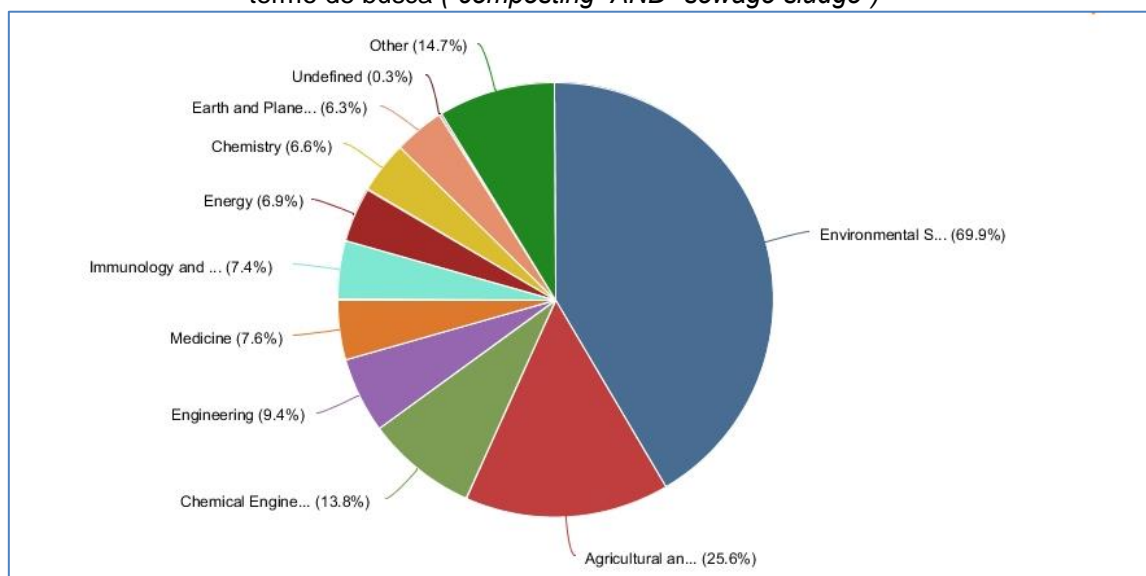
Figura 36 - Rede de relacionamento entre autores do Brasil com autores de outros países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (*"composting" AND "sewage sludge"*)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da Scopus.

As áreas de conhecimento que abrangem o estudo da compostagem e lodo de esgoto também se destacam-se o meio ambiente (69,9%) e agricultura (25,6%), e também, continuam sendo multidisciplinares sua distribuição, conforme o Gráfico 33.

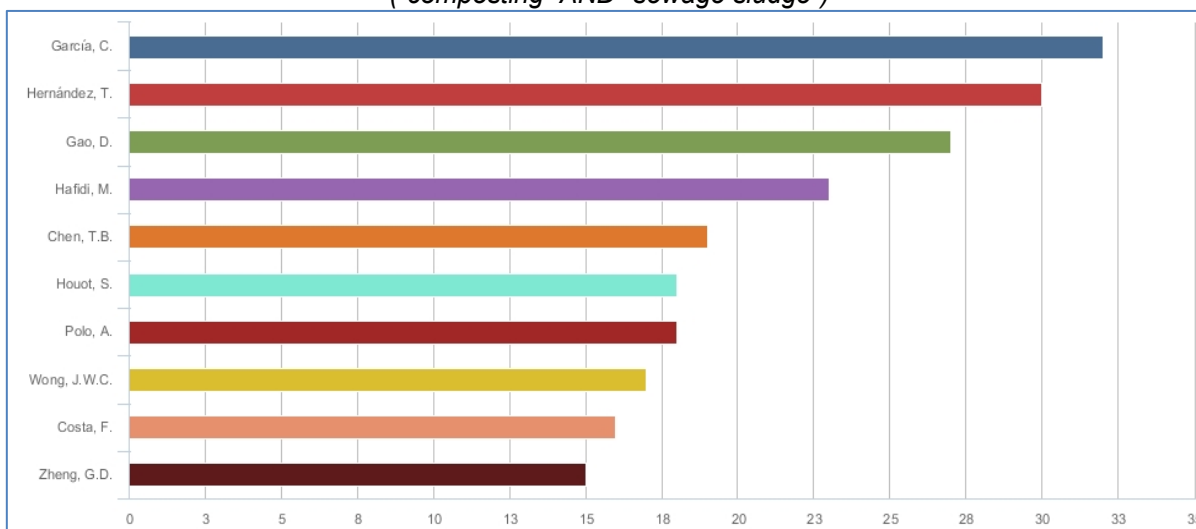
Gráfico 33 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND "*sewage sludge*")



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

O gráfico 34 apresenta os autores com maior quantidade de trabalhos publicados sobre o tema, com destaque para Garcia, C, Hernández, T e GAO, D. Também observa-se na rede de autores que apresentaram maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND "*sewage sludge*") várias redes de autores que apresentaram maior quantidade de produção de artigos.

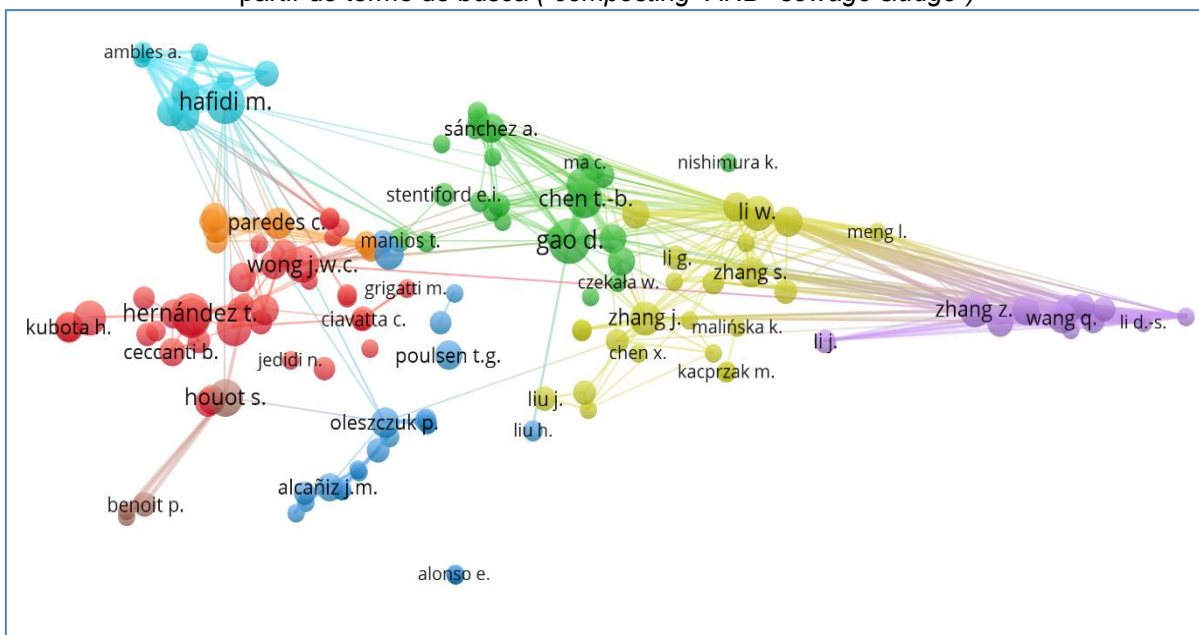
Gráfico 34 - Autores com maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND "*sewage sludge*")



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Estas redes podem ser observadas pelas diferentes cores que compõe a rede total de relacionamento, observadas na Figura 37, com destaque para os autores Gao, D, Hafidi, M, Wong, J, Hernández, T, Zhang, J, Zhang, Z, Znahez, A, Li, W, que aparecem em destaque no centro destas redes de relacionamento.

Figura 37 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND "*sewage sludge*")



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

## 2.4 APLICAÇÕES DO MÉTODO “RESPIROMÉTRICO” NA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM - REVISÃO CONCEITUAL BIBLIOMÉTRICA

O método “respirométrico” ou simplesmente “respirometria” é um procedimento em que as medições da velocidade ou taxa de consumo de oxigênio, ou a taxa de geração de subprodutos gasosos decorrentes da atividade respiratória de uma biomassa ativa quando as mesmas efetuam a degradação biológica de um substrato orgânico, são efetuadas em meios líquidos ou gasosos (AKUTSU, 2009), e podem ser utilizados dentro dos sistemas fechados ou reatores biológicos.

Segundo Scaglia *et al.* (2000), a variação temporal do consumo de oxigênio, pode ser avaliada segundo dois métodos: estático e dinâmico. O método de medição estático de consumo de oxigênio é aquele em que, nos experimentos ou sistemas reais de compostagem, em função da inexistência de mistura contínua (daí o termo estático) e controlada dos resíduos, não é assegurado ou torna-se limitado o

processo de transferência, restringindo dessa maneira a difusão e o transporte de oxigênio de forma homogênea à massa total de resíduos.

O método de medição dinâmico consiste na utilização de matriz de resíduo sólido compondo um meio trifásico (interação das fases sólida-líquida-gasosa), associada a processo de mistura contínua, tal como ocorre em sistemas “in vessel”, tipo tambores rotativos.

No caso de processos de compostagem, em que há a predominância de atividades de bactérias aeróbias na degradação dos resíduos, as medidas tanto da taxa de consumo de oxigênio ( $O_2$ ) quanto da taxa de geração temporal de gás carbônico ( $CO_2$ ), que no caso é o subproduto gasoso principal, podem ser realizadas na atmosfera de um ambiente controlado, como, por exemplo, do interior de um reator (AKUTSU, 2009).

De acordo com Akutsu (2009), essa medição sistemática das taxas de consumo de oxigênio e produção de gás carbônico ao longo do processo tem sido denominada respirograma do processo na literatura especializada do respirograma pode-se extrair diversas informações e índices, possibilitando inclusive que as fases (lag, exponencial e endógena) do processo sejam identificadas. A fase lag é aquela associada à partida do processo onde em geral existe o início de crescimento e adaptação das bactérias ao meio e resíduo.

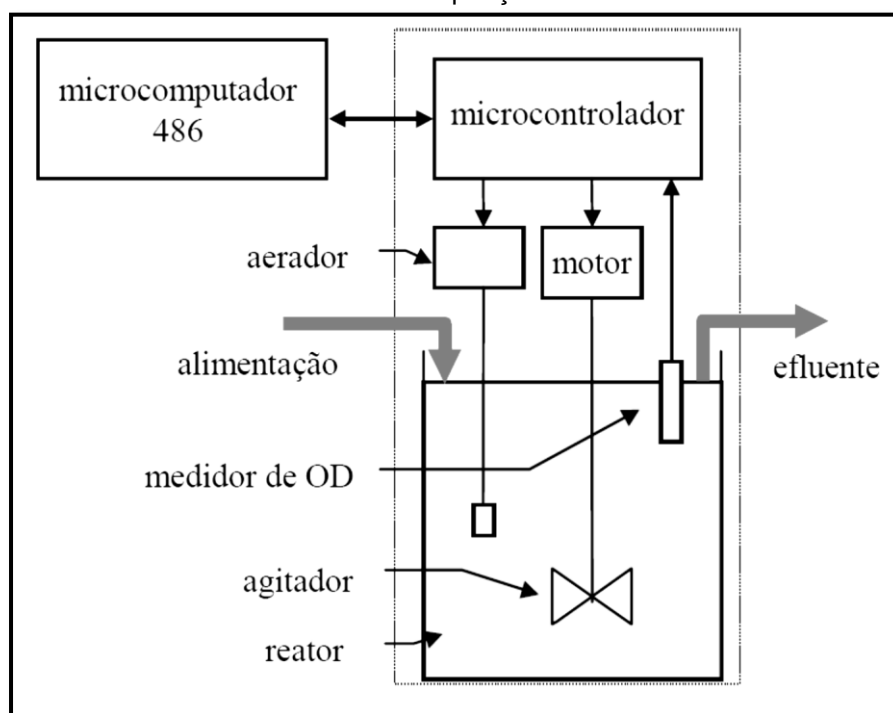
A fase exponencial caracteriza-se por uma intensa atividade bacteriana na conversão dos resíduos, em geral associada à intensa liberação de calor em que pode haver predomínio de bactérias termofílicas. A fase endógena caracteriza-se pela extinção gradativa de alimentos para as bactérias, sendo que as mesmas se utilizam das próprias reservas energéticas para efetuar a respiração. Na prática, ela caracteriza o final do processo inicial aqui denominado de bioestabilização, após o qual se inicia a fase de humificação do composto.

Nota-se no caso que as variações percentuais da taxa de consumo de  $O_2$ , se apresentam na faixa de 20% a 15%, e que a respectiva taxa de geração percentual do  $CO_2$ , se encontram na faixa de 0% a 5%. Além do aspecto de controle de produção de composto de qualidade, o grau de estabilidade desejado num processo de compostagem determinará diversos parâmetros de controle e dimensionamento do sistema, tais como taxa de aeração, e tempo de tratamento requerido para cada tipo de resíduo orgânico, considerando os diversos aspectos qualitativos intrínsecos envolvidos

Para Catunda *et al.* (1998), a medição da taxa de respiração ou Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO) é de grande importância para o controle e monitoração de sistemas de lodo ativado. A TCO provê informações sobre a qualidade do afluente e do lodo ativado e pode indicar também a presença de elementos tóxicos no afluente que possa comprometer o desempenho do sistema.

Resultados experimentais qualitativos, obtidos com um sistema de lodo ativado em escala reduzida através de um sistema de aquisição de dados a microcontrolador conectado a um PC, e resultados de simulações, são apresentados e comparados através de um protótipo de um sistema de lodo ativado foi construído no laboratório para realização de testes experimentais como se apresenta na Figura 38.

Figura 38 - Protótipo de um sistema de tratamento de lodo ativado com sistema de aquisição de dados



Fonte: Catunda *et al.*, 1998.

O protótipo é constituído de um reator de 6 litros, um agitador, um aerador e um tanque de alimentação. Usou-se um microcontrolador para aquisição de dados, análise e controle dos dispositivos externos. Um executivo em tempo real foi implementado para esse microcontrolador com a finalidade de controlar e sincronizar as diversas tarefas do sistema, tais como aquisição periódica de dados e comunicação com um microcomputador, no qual os dados são apresentados em forma gráfica e armazenados (CATUNDA *et al.* 1998).

Em pesquisa abordando os métodos respirométricos voltados ao controle biológico em geral, com técnicas desenvolvidas para a aplicação em tratamentos de águas residuárias, principalmente no controle de processos por lodos ativados e recentes desenvolvimentos do método para a aplicação em sistemas de tratamento por fitodepuração (Wetlands), Andreottola *et al.* (2005). descreve novos métodos que foram desenvolvidos no *Laboratório di Ingegneria Sanitaria-Ambientale* (LISA) da *Università di Trento*, Itália, como observa-se na Figura 39.

Figura 39 - Respirômetro AIR NL desenvolvido pelo LISA - Università di Trento



Fonte: Andreottola *et al.* (2005).

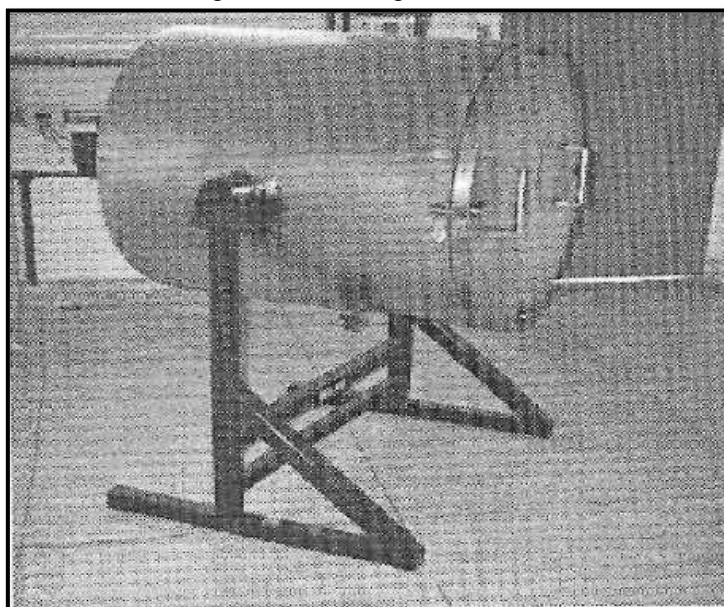
Estes métodos baseiam-se em duas metodologias de laboratório para a aplicação da respirometria em bioderuração: o primeiro caracteriza a atividade bacteriológica do solo com a finalidade de medir a concentração de  $O_2$  na fase gasosa, o outro avalia a concentração de  $O_2$  na fase aquosa.

Para Andreotolla *et al.* (2005), a TCO representa um dos principais componentes a ser quantificado no procedimento de projeto e/ou gestão do tratamento de águas residuárias, uma vez que este depende da quantidade de oxigênio que se tornará disponível para o processo biológico no solo. É importante conhecer se o processo de biodegradabilidade no solo se realiza em condições aeróbias, apresentando assim suficiente  $O_2$  em fase aquosa, ou em condições anaeróbias, após o oxigênio ser completamente exaurido.

Fernandes *et al.* (2000), também apresentam pesquisa utilizando-se de tecnologia básica desenvolvida para um reator piloto, de forma cilíndrica, de 80cm de comprimento e 70cm de diâmetro, hermeticamente fechado e dotado de equipamentos periféricos que permitem o total controle do processo de aeração durante a biodegradação aeróbia de substratos orgânicos no estado sólido.

O reator piloto, visto na Figura 40, composto por um cilindro que é montado sobre duas hastes de metal, com plataformas, que fixam o reator e permitem que ele bascule, podendo ficar na posição inclinada para cima (carregamento), na horizontal (posição de serviço) e inclinada para baixo (descarga).

Figura 40 - Vista geral do reator



Fonte: Fernandes et.al., 2000.

Na parte inferior interna estão fixados os difusores de ar e a sonda para medida da temperatura. Na parte frontal, uma tampa circular, dotada de borracha, fecha o reator hermeticamente. O controle da aeração é feito de forma automatizada através de um Controlador Lógico Programável (PLC), ligado a um microcomputador, que armazena *on line* os dados de evolução da temperatura, vazão de ar, teor de  $O_2$  nos gases de saída do sistema e incrementos de vazão de ar. No projeto piloto os equipamentos utilizados foram:

a) O medidor de temperatura utilizado é uma sonda com sensor Pt 100 Din, acompanhada de um processador modelo HT 290, da *Hitec*®;

b) O medidor de teor de Oxigênio (Oxímetro) proporciona a medida do teor de O<sub>2</sub> no ar através de uma célula bioquímica. Seu modelo é 100F da Califórnia Analytical (Simatic);

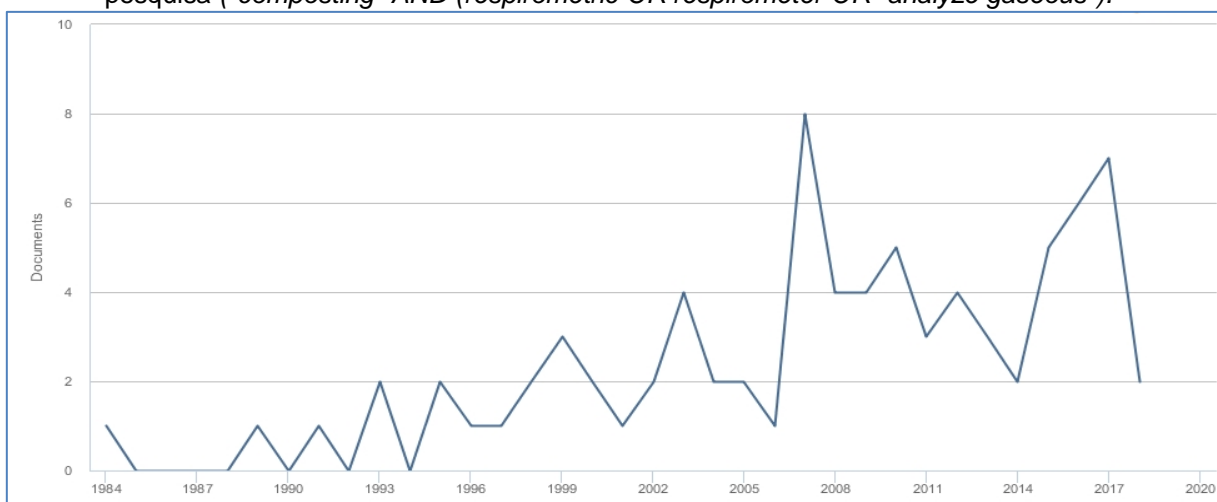
c) O medidor de vazão de ar, tipo *Vortex* integral, modelo YF101, da Yokogawa.

O trabalho de pesquisa é apresentado, como exemplo, os dados de monitoramento de um experimento de compostagem de lodo de esgoto e serragem de madeira. O objetivo do piloto é permitir o estudo da biodegradabilidade de substratos orgânicos e gerar parâmetros de projeto para usinas em escala real.

### 2.4.1 Revisão Bibliométrica

Foi pesquisada neste eixo, a palavra-chave no idioma inglês ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*")) ou seja, compostagem e (respirométrico ou respirometria ou análise gasosa), utilizando-se como campo de pesquisa "*Article title*" (título do artigo), "*Abstract*" (resumo) e "*Keywords*" (palavra-chave), selecionando-se apenas os documentos que foram intitulados de "*Article*" (artigo) sendo encontrados um total de 81 artigos que atingiram estes argumentos. Os documentos foram publicados no período de 1984 a 2018, distribuídos ao longo da linha do tempo conforme o Gráfico 35:

Gráfico 35 - Quantidade de Quantidade de artigos publicados de 1984 a 2018 utilizando termo de pesquisa ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*")).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Verifica-se que a quantidade de pesquisas publicadas anualmente é muito pequena, atingindo seu valor máximo em 2007, com oito publicações. No Quadro 11 são apresentados os 22 trabalhos mais citados a partir dos termos pesquisados.

Quadro 11 - Artigos com maior número de citações a partir da pesquisa com o termo ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))

	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de Public.	Periódico	Cit.
1	The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend	Liang, C., Das, K.C., McClendon, R.W.	2003	Bioresource Technology Volume 86, Edição 2, Janeiro de 2003, Páginas 131-137	303
2	Evaluation of city refuse compost maturity: a review	Iglesias Jiménez, E., Perez Garcia, V.	1989	Biological Wastes Volume 27, Edição 2, 1989, Páginas 115-142	238
3	Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity	Said-Pullicino, D., Erriquens, F.G., Gigliotti, G.	2007	Bioresource Technology Volume 98, Edição 9, Julho de 2007, Páginas 1822-1831	229
4	A simple respirometric technique for assessing compost stability	Lasaridi, K.E., Stentiford, E.I.	1998	Water Research Volume 32, Edição 12, Dezembro de 1998, Páginas 3717-3723	181
5	A quantitative respirometric method for monitoring compost stability	Iannotti, D.A., Pang, T., Toth, B.L., Elwell, D.L., Hoitink, H.A.J.	1993	Compost Science and Utilization Volume 1, 1993 - Edição 3, Páginas 52-65	164
6	Biodegradation of thermally-oxidized, fragmented low-density polyethylenes	Chiellini, E., Corti, A., Swift, G.	2003	Polymer Degradation and Stability Volume 81, Edição 2, 2003, Páginas 341-351	160
7	Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions	Kale, G., Auras, R., Singh, S.P., Narayan, R.	2007	Polymer Testing	145
8	Biodegradation of poly(vinyl alcohol) based blown films under different environmental conditions	Chiellini, E., Corti, A., Solaro, R.	1999	Polymer Degradation and Stability	99
9	Biodegradation of thermally oxidized polyethylene	Weiland, M., Daro, A., David, C.	1995	Polymer Degradation and Stability Volume 48, Edição 2, 1995, Páginas 275-289	90
10	Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting	Francou, C., Linères, M., Derenne, S., Villio-Poitrenaud, M.L., Houot, S.	2008	Bioresource Technology Volume 99, Edição 18, Dezembro de 2008, Páginas 8926-8934	85
	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de	Periódico	Cit.

Public.					
11	Monitoring the biological activity of the composting process: Oxygen uptake rate (OUR), respirometric index (RI), and respiratory quotient (RQ)	Gea, T., Barrena, R., Artola, A., Sánchez, A.	2004	Biotechnology and Bioengineering Volume 88, Edição 4, Páginas 520-527.	85
12	Determination of biological stability in compost: A comparison of methodologies	Baffi, C., Dell'Abate, M.T., Nassisi, A., (...), Genevini, P.L., Adani, F.	2007	Soil Biology and Biochemistry Volume 39, Edição 6, Junho de 2007, Páginas 1284-1293	77
13	Respirometric assays at fixed and process temperatures to monitor composting process	Gómez, R.B., Lima, F.V., Bolasell, Ma.A.G., Gea, T., Ferrer, A.S.	2005	Bioresource Technology Volume 96, Edição 10, Julho de 2005, Páginas 1153-1159	70
14	Respiration index determination: Dynamic and static approaches	Scaglia, B., Tambone, F., Genevini, P.L., Adani, F.	2000	Compost Science and Utilization Volume 8, 2000 - Edição 2, Páginas 90-98	59
15	Respiration profiles in monitoring the composting of by-products from the olive oil agro-industry	Mari, I., Ehaliotis, C., Kotsou, M., Balis, C., Georgakakis, D.	2003	Bioresource Technology Volume 87, Edição 3, Maio de 2003, Páginas 331-336	53
16	Induction of PAH-catabolism in mushroom compost and its use in the biodegradation of soil-associated phenanthrene	Reid, B.J., Fermor, T.R., Semple, K.T.	2002	Environmental Pollution Volume 118, Edição 1, Junho de 2002, Páginas 65-73	49
17	Composting of dewatered wastewater sludge with various ratios of pruning waste used as a bulking agent and monitored by respirometer	Ponsá, S., Pagans, E., Sánchez, A.	2009	Biosystems Engineering Volume 102, Edição 4, Abril de 2009, Páginas 433-443	47
18	Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients	Gil, M.V., Carballo, M.T., Calvo, L.F.	2008	Waste Management Volume 28, Edição 8, 2008, Páginas 1432-1440	47
19	Stability measurement of biosolids compost by aerobic respirometry	Paletski, W.T., Young, J.C.	1995	Compost Science and Utilization Volume 3, 1995 - Edição 2, Páginas 16-24	43
20	Biodegradable composites based on starch/EVOH/glycerol blends and coconut fibers	Rosa, M.F., Chiou, B.-S., Medeiros, E.S., (...), Orts, W.J., Imam, S.H.	2009	Journal of Applied Polymer Science Volume 111, Edição 2 15 de janeiro de 2009, Páginas 612-618	42
21	A sewage sludge co-composting process using respirometric monitoring method in hermetic rotary reactor	Scoton, E.J., Battistelle, R.A.G., Bezerra, B.S., Akutsu, J.	2016	Journal of Cleaner Production Volume 121, 10 de maio de 2016, páginas 169-175	17

	Título do Trabalho	Autor(es)	Ano de Public.	Periódico	Cit.
22	Parameters evaluation of the co-composting of sewage sludge and grass clippings using the respirometric method	Scoton, E.J., Battistelle, R.A.G., Bezerra, B.S., Renóbio, A., Akutsu, J.	2015	International Journal of Environment and Waste Management Volume 16, Edição 3, 2015	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

O trabalho com maior quantidade de citações nestes termos de pesquisa foi o trabalho já discutido de Liang *et al.* (2003), com 303 citações, que analisou a influência dos regimes de temperatura e conteúdo de umidade na atividade microbiana aeróbia de uma mistura de compostagem de biossólidos.

Uma revisão de Iglesias Jiménez e Perez Garcia (1989), fez a avaliação da maturidade do composto de lixo urbano. A avaliação da maturidade do composto doméstico de lixo tem sido amplamente reconhecida como um dos problemas mais importantes relacionados ao processo de compostagem e à aplicação deste produto na terra. Isso deu origem, nos últimos anos, a uma grande quantidade de informações na literatura.

Organizar e esclarecer essas informações foram os objetivos fundamentais do presente artigo. Em primeiro lugar, estudou-se os efeitos do composto com maturação insuficiente no sistema solo-planta, e são descritos os critérios e métodos propostos para a determinação da maturidade do composto. Também foram estabelecidas as condições ou características que o composto deve atender para garantir um grau de maturidade aceitável.

As alterações nas características químicas da matéria orgânica extraível com água durante a compostagem e sua influência na estabilidade e maturidade do composto, foram objetos de estudo de Said-Pullicino *et al.* (2007). Tendo em vista a variedade de parâmetros geralmente utilizados para estudar os processos de compostagem, este trabalho buscou identificar os principais processos químicos que ocorrem em solução e sua influência na obtenção de estabilidade e maturidade com o tempo de compostagem. Estabilidade do composto, avaliada por meio de análise respirométrica, que determinou a demanda de oxigênio como resultado da mineralização da matéria orgânica do composto e a maturidade do composto avaliada com *Lepidium sativum*. Os bioensaios mostraram-se altamente relacionados à natureza e ao conteúdo de matéria orgânica solúvel em água. A pesquisa de Iannotti *et al.* (1993) foi um método respiratório quantitativo para

monitorar a estabilidade do composto. A estabilidade do composto foi quantificada usando a respirometria com oxigênio dissolvido (DO) durante a compostagem de resíduos sólidos urbanos (RSU) em um sistema em escala piloto. Alterações na estabilidade das amostras colhidas em vários momentos durante o processo de compostagem foram verificadas com testes químicos e físicos. As taxas de variação do nível de oxigênio no ar através de uma amostra de composto incubadas num frasco a 37°C foram convertidos a uma taxa de O<sub>2</sub> absorção/(g de sólidos voláteis · hora). A captação de oxigênio, determinada com a respirometria do OD e convertida em taxas de perda de matéria seca, foi correlacionada com as taxas reais, calculadas a partir dos balanços de energia observados no sistema em escala piloto.

Chiellini *et al.* (2003) pesquisaram a biodegradação de polietilenos de baixa densidade fragmentados, oxidados termicamente. Os aditivos pró-oxidantes foram submetidos a uma investigação destinada a avaliar sua biodegradação final (por exemplo, mineralização) no solo e no meio de incubação de composto maduro. Testes respiratórios, com o objetivo de simular condições de enterro e compostagem (composto maduro), foram utilizados para testar a biodegradabilidade potencial das poliolefinas no ambiente.

Weiland *et al.* (1995) pesquisaram a biodegradação de polietileno oxidado termicamente. A biodegradabilidade do polietileno oxidado termicamente (PE) foi estudada em várias condições: (1) em ágar sólido na presença de uma suspensão de esporos mistos de quatro fungos (*Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Paecilomyces variotii* e *Gliocladium virens*); (2) em três unidades de compostagem que diferem em temperatura, teor de umidade e natureza dos materiais compostados; e (3) em meio líquido (frascos respirométricos) na presença de três cepas de *Streptomyces* (*badius*, *setonii*, *viridosporus*) ou de uma suspensão de microrganismos do composto. Evidências qualitativas de bioassimilação dos filmes de PE oxidados foram obtidas com fungos e compostos.

A influência da proporção inicial de resíduos verdes, resíduos orgânicos e papel-papelão nas transformações de matéria orgânica durante a compostagem em reatores em escala piloto foi estudada por Francou *et al.* (2008), usando procedimento respirométrico, extração de substâncias húmicas, análise de fibras brutas e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier. A estabilização da MO durante a compostagem resultou da degradação da fração orgânica facilmente biodegradável como celulose e hemicelulose, do aumento

relativo de compostos resistentes como lignina, da síntese microbiana de biomoléculas resistentes e de processos de humificação.

Gea *et al.* (2004) estudaram o monitoramento da atividade biológica do processo de compostagem: taxa de captação de oxigênio (OUR), índice respirométrico (IR) e quociente respiratório (RQ). A compostagem de vários resíduos orgânicos de diferentes composições químicas (fração orgânica separada por fonte de resíduo sólido municipal, lodo bruto desidratado, lodo digerido anaerobicamente desidratado e lodo de papel) foi realizada sob condições controladas para estudar a adequação de diferentes índices biológicos (taxa de absorção de oxigênio, índice respirométrico e quociente respiratório) para monitorar a atividade biológica do processo de compostagem. Entre os índices testados, a taxa de captação de oxigênio (também conhecida como índice respirométrico dinâmico) forneceu os valores mais confiáveis da atividade microbiana em um ambiente de composto. Por outro lado, os valores do índice respirométrico estático medidos à temperatura do processo, especialmente nos estágios iniciais do processo de compostagem, foram significativamente inferiores aos do índice dinâmico, provavelmente devido a limitações de difusão de oxigênio presentes em sistemas estáticos. Os índices estático e dinâmico foram semelhantes durante a fase de maturação.

A determinação da estabilidade biológica em composto, por meio de uma comparação de metodologias foi o estudo de Baffi *et al.* (2007). O índice biológico, índice respiratório dinâmico (DRI); índices de humificação química: índice de humificação (HI), grau de humificação (DH) e taxa de humificação (HR); e termoanalítico (índice termoestabilidade, R1 e uma fração lábil) foram índices usados para avaliar a estabilidade de compostagem de 15 produtos finais.

Também Gómez *et al.* (2005) analisaram ensaios respirométricos em temperaturas fixas e de processo para monitorar o processo de compostagem, por meio de um respirômetro estático foi construído para determinar o índice de respiração (IR) das amostras de compostagem. Os índices de respiração de diferentes lodos foram determinados a 37°C (IR 37 ) e à temperatura in situ do compositador na amostragem. Os resultados indicaram que ambos os índices se correlacionaram bem com a evolução da temperatura no compositador. IR eram mais representativos da atividade metabólica no reator e mais sensíveis às variações de temperatura e composição do material de compostagem, mas não podiam indicar a estabilidade do material nas fases posteriores do processo.

Scaglia *et al.* (2000) pesquisaram a determinação do índice de respiração por meio de abordagens dinâmicas e estáticas. Quarenta e cinco matrizes orgânicas de diferentes tipos e procedências foram submetidas ao teste para determinação da estabilidade biológica por meio da medida respirométrica dinâmica (DRI) e medida respirométrica estática (SRI). Os resultados obtidos na comparação entre os dois índices indicaram que o SRI, comparado ao DRI, subestima o consumo de oxigênio pelas biomassas e, conseqüentemente, a taxa de estabilidade biológica por um fator igual a 2.

Já o artigo de Mari *et al.* (2003), demonstra os perfis de respiração no monitoramento da compostagem de subprodutos da agroindústria de azeite. A compostagem de torta de azeitona (OPC) misturada repetidamente com águas residuais de moinho de azeitona (OPC + OMW) ou com água da torneira (OPC + W) foi estudado usando o respirômetro termogradiante, um aparelho que determina as taxas de respiração de um substrato em uma ampla faixa de temperaturas diferentes (perfil respiratório). Os processos de compostagem ocorreram ao longo de um período de cinco meses, durante os quais nove humidificações do OPC foram realizadas com os respectivos líquidos.

Reid *et al.* (2002) estudaram a indução do catabolismo da HAP (Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) em composto de cogumelos e seu uso na biodegradação de fenantreno associado ao solo. Chama-se catabolismo ou metacatabolismo a parte do metabolismo que se refere à assimilação ou processamento da matéria orgânica adquirida pelos seres vivos para fins de obtenção de energia. Este conjunto de processos diz respeito às vias de degradação, ou seja, de quebra das substâncias.

Compostagem de lodo de águas residuais desidratadas com várias proporções de resíduos de poda usados como agente de volume e monitorados por respirômetro foi o trabalho realizado por Ponsá *et al.* (2009). Foram estudados os efeitos de diferentes proporções volumétricas de lodo de águas residuais por agente de volume no desempenho da compostagem em grande escala. As proporções volumétricas de lodo de águas residuais para resíduos de poda, usadas como agente de volume, foram 1:2 (Pilha 1), 1:2,5 (Pilha 2) e 1:3 (Pilha 3). As experiências foram realizadas em uma planta descoberta, utilizando compostagem de leiras com torneamento semanal. Para monitorar a evolução das três pilhas de compostagem, parâmetros de rotina, como temperatura e nível de oxigênio intersticial, parâmetros

químicos, como matéria orgânica, umidade e razão C/N , e índices biologicamente relacionados, como índices de respiração à temperatura do processo foram monitorados.

A pesquisa de Gil *et al.* (2008) foi a fertilização de milho com composto de esterco bovino suplementado com nutrientes minerais adicionais, considerada pelo autor uma abordagem alternativa para o manejo de esterco bovino em fazendas intensivas é o processo de compostagem. Uma fábrica de compostagem em escala industrial foi criada no noroeste da Espanha para a produção de composto a partir de esterco bovino. A compostagem de estrume envolveu aumento do pH, condutividade elétrica (CE), capacidade de troca catiônica (CEC) e concentração e diminuição da temperatura, teor de umidade, teor de matéria orgânica (MO), concentração e relação C/N. As concentrações de Cu, Zn e Ni aumentaram devido à redução da massa de estacas durante o processo de compostagem. O composto resultante foi aplicado a um campo para estudar a viabilidade da aplicação desse composto combinado com um fertilizante mineral nitrogenado como substituto da fertilização mineral convencionalmente utilizada para o milho (*Zea mays* L.). A fase termofílica do processo de compostagem foi muito prolongada no tempo, o que pode ter retardado a decomposição da matéria orgânica e reduzido o processo de nitrificação, levando a uma fase de maturação muito curta.

Os índices de humificação e respirometria, no entanto, determinados imediatamente após a aplicação do composto no solo, mostraram-se estáveis. A aplicação de adubo não diminuiu o rendimento de grãos. Um ano depois, o pH do solo, o teor de MO e o CEC foram maiores com o tratamento do composto. As concentrações totais de P, K, Ca e Na nas parcelas com adubo foram superiores às fertilizadas com minerais, e não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos nas concentrações de P, Mg e B disponíveis. O composto não causou poluição por metais pesados no solo. Portanto, este composto seria um bom substituto para os fertilizantes minerais geralmente usados para o curativo basal no cultivo de milho.

Paletski e Young (1995) analisaram a medição da estabilidade do composto de biossólidos por respirometria aeróbia. A captação de oxigênio do composto de biossólidos foi medida durante os estudos laboratoriais e em larga escala. A respirometria aeróbia de amostras sólidas de composto proporcionou uma medida precisa da atividade microbiana. Houve uma notável tendência decrescente no

consumo de oxigênio durante 25 dias de compostagem, indicando aumento da estabilidade. O teor de umidade também afetou a estabilidade do composto. Durante os testes do respirômetro de 48 horas, a amostra de composto não secou ao ponto em que a respiração foi inibida.

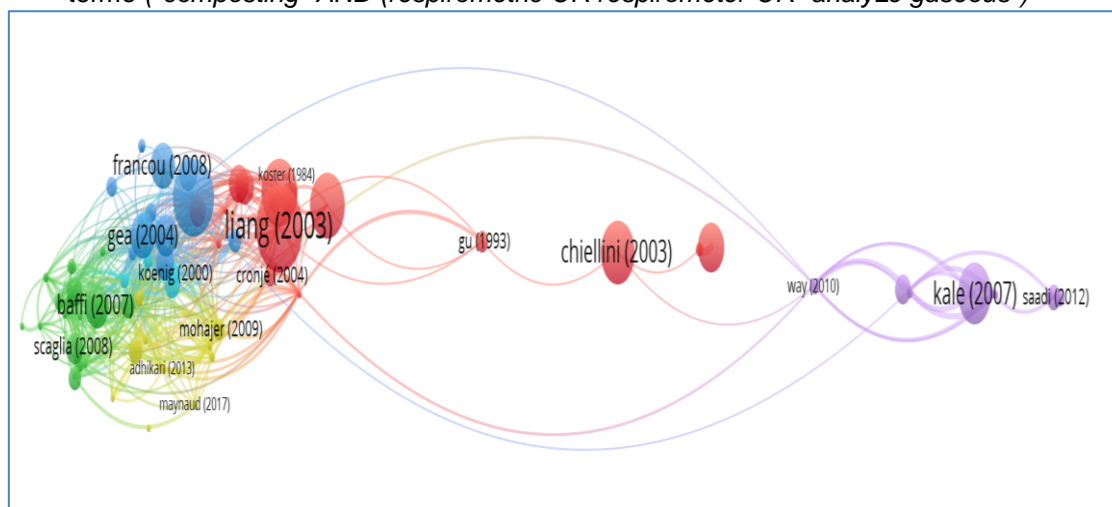
Rosa *et al.* (2008) estudaram compósitos biodegradáveis à base de amido / EVOH/glicerol e fibras de coco, utilizando fibras de coco verdes como cargas em uma matriz polimérica biodegradável de amido/álcool etileno vinílico (EVOH)/glicerol. Os efeitos do teor de fibra nas propriedades mecânicas, térmicas e estruturais foram avaliados. A adição de fibra de coco nas misturas de amido/EVOH/glicerol reduziu o comportamento dúctil da matriz, tornando os compósitos mais frágeis. Com baixo teor de fibra, as misturas foram mais flexíveis, com maior resistência à tração do que em níveis mais altos de fibra. A temperatura na taxa máxima de degradação mudou ligeiramente para valores mais baixos à medida que o conteúdo de fibra aumentava. Comparando misturas com e sem fibras, não houve mudança drástica na temperatura de fusão da matriz com aumento do teor de fibras, indicando que as fibras não levaram a mudanças significativas na estrutura cristalina.

No Brasil, especificamente na Universidade Estadual Paulista, na Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Scoton *et al.* (2016) realizaram pesquisa com o objetivo de monitorar a atividade biológica do processo de compostagem de lodo de esgoto, bagaço de cana e café moído em um reator rotativo hermético utilizando o método respirométrico em escala laboratorial, a fim de obter parâmetros e o design do sistema para projetos de grande escala. Outra particularidade deste estudo é o uso de um reator hermético com ciclos de purga de gás.

A purga foi realizada quando a porcentagem de oxigênio alcançou menos de 5%, eliminando a mistura gasosa (com relação de CO<sub>2</sub> elevada) e a introdução de ar ambiental com cerca de 21% de O<sub>2</sub>, sucessivamente até o composto ser estabilizado. Os intervalos médios de purga obtidos foram 29 h e 2 min com frequência de rotação do reator de 15 min. O tempo de estabilização do composto foi otimizado em 60% se comparado aos 90 dias no método tradicional. Os resultados obtidos podem ser utilizados para a concepção do processo em escala industrial usando um simples analisador de gás.

Na Figura 41 pode ser observado o relacionamento dos autores com mais citações, com destaque para Gea(2004), Liang (2003), Chiellini (2003) e Kale (2007).

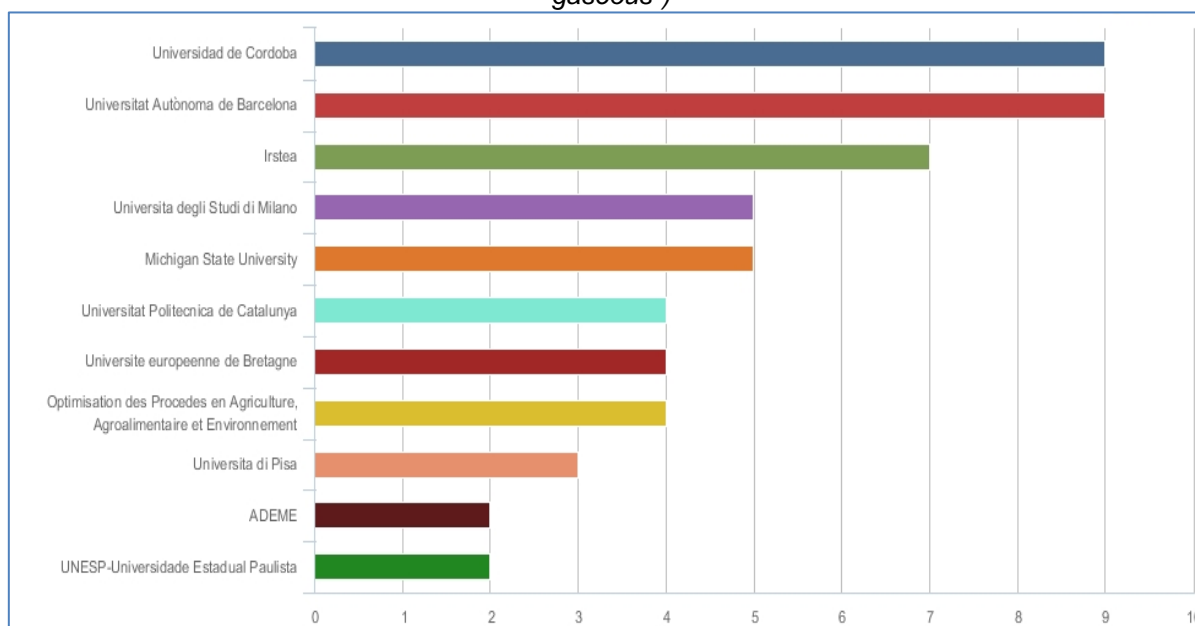
Figura 41 - Rede de relacionamento de artigos com mais citações, obtidos pela pesquisa do termo ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

No Gráfico 36 se observa os artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*")).

Gráfico 36 - Quantidade de artigos publicados por Instituições de Ensino no mundo, utilizando-se como termo de pesquisa o termo ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Observa-se que com nove publicações a da *Universidad de Córdoba* (Espanha) e também com nove publicações a *Universidad Autònoma de Barcelona*, demonstrando que a Espanha é um polo de pesquisas e publicações sobre o tema. No Brasil observamos dois trabalhos sobre o tema, pesquisas de Scoton *et al.*, pela Universidade Estadual Paulista - Unesp, na Faculdade de Engenharia de Bauru.

As palavras-chaves mais citadas foram “*Composting*” em 84% dos artigos e *Biodegradation*, em 43% dos trabalhos. Destaca-se ainda em 32% “*soil*”, demonstrando a preocupação das pesquisas com a recomposição de matéria orgânica no solo (Tabela 11).

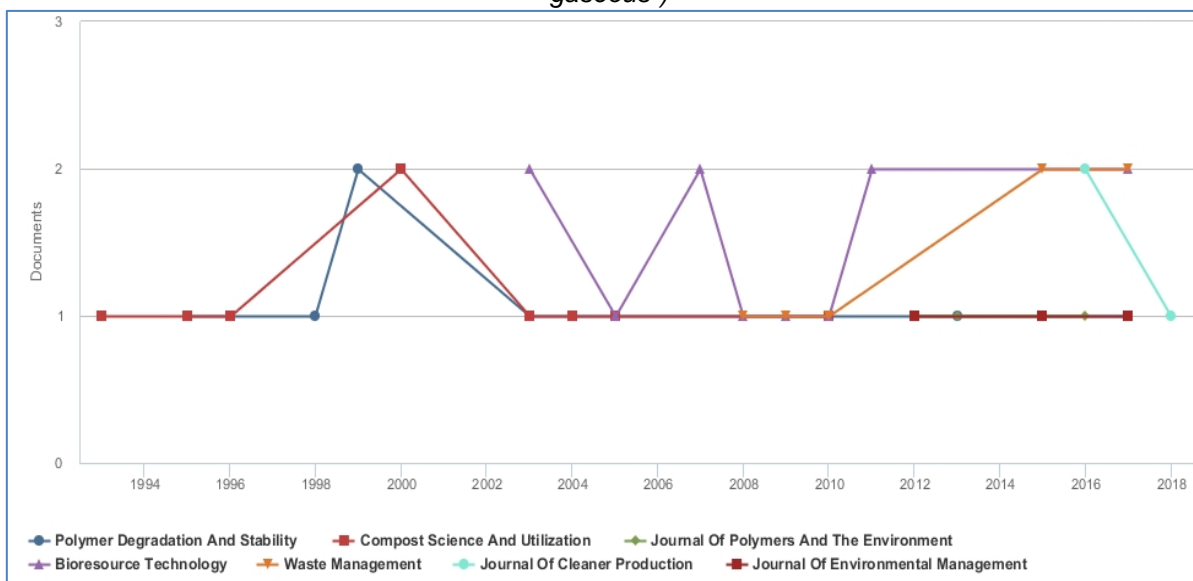
Tabela 11 - Palavras chaves com maior incidência nos artigos obtidos a partir de pesquisa utilizando o termo (“*composting*” AND (*respirometric* OR *respirometer* OR “*analyze gaseous*”))

	Palavra-chave	Citações	%
1	Composting	68	84%
2	Biodegradation	35	43%
3	Article	32	40%
4	Compost	26	32%
5	Soil	26	32%
6	Priority Journal	22	27%
7	Respirometry	22	27%
8	Oxygen	19	23%
9	Waste Treatment	19	23%
10	Biodegradability	16	20%
11	Organic Matter	16	20%
12	Oxygen Consumption	16	20%
13	Sewage Sludge	15	19%
14	Sewage	14	17%
15	Sludge	14	17%
16	Stability	13	16%
17	Temperature	13	16%
18	Refuse Disposal	12	15%
19	Respiration	12	15%
20	Waste Management	12	15%

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

Mantiveram-se a maioria dos periódicos já citados, nesta busca dos periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir dos termos de busca (“*composting*” AND (*respirometric* OR *respirometer* OR “*analyze gaseous*”). Acrescenta-se somente o periódico *Journal of Cleaner Production*. Verifica-se ainda que as produções sobre o tema tiveram início apenas no final dos anos 1990 e início dos anos 2000, porém com poucos trabalhos ainda publicados (Gráfico 37).

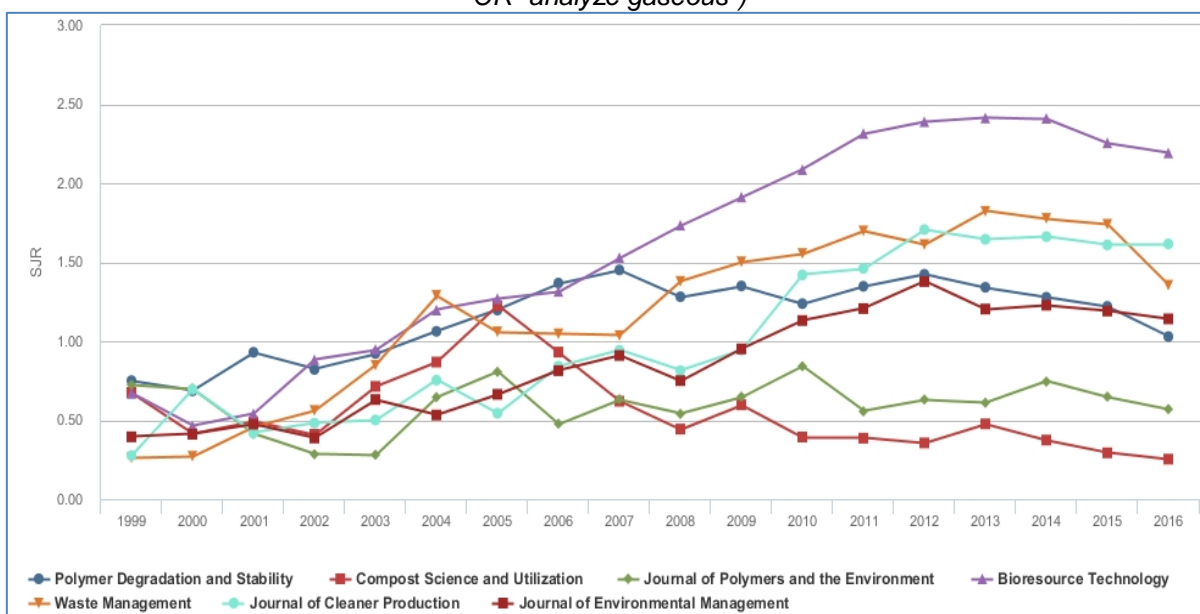
Gráfico 37 - Periódicos que apresentaram maior quantidade de documentos publicados, obtidos a partir do s termos de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Também, analisando-se os indicadores *SCImago Journal Rank* (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*")), verificamos que os periódicos que apresentam um melhor índice são os periódicos *Bioresource Techonology*, *Journal Of Cleaner Production* e *Waste Management*, nesta ordem. Estes dados são apresentados no Gráfico 38:

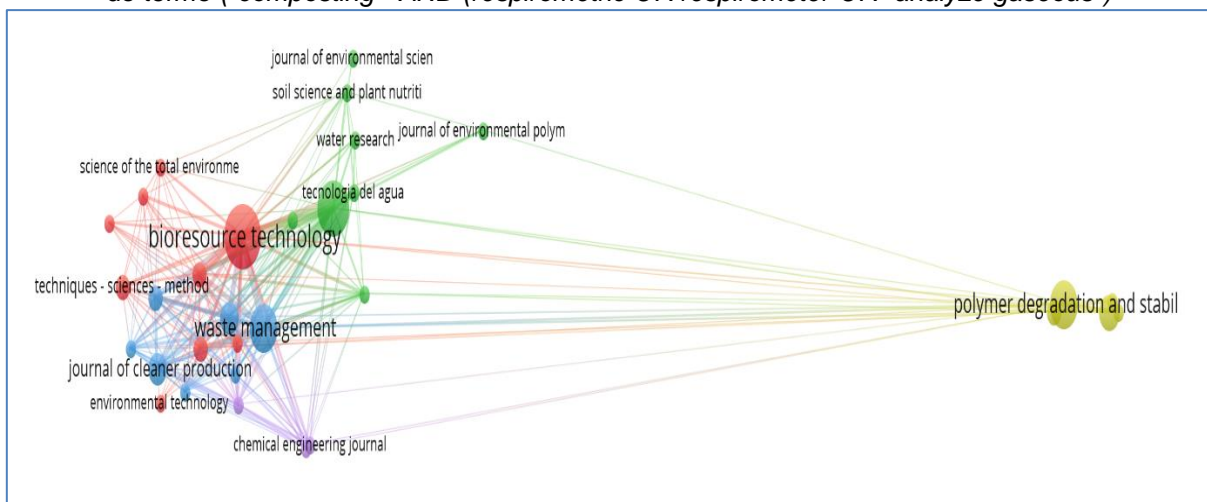
Gráfico 38 - Indicadores *SCImago Journal Rank* (SJR) dos periódicos com maior número de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

O periódico *Bioresource Technology* também é o que aparece com maior destaque entre as redes de periódicos que apresentaram os resultados da busca. Destacamos ainda os periódicos *Waste Management*, *Tecnologia del Agua* e *Polymer Degradation and Stabil* (Figura 42).

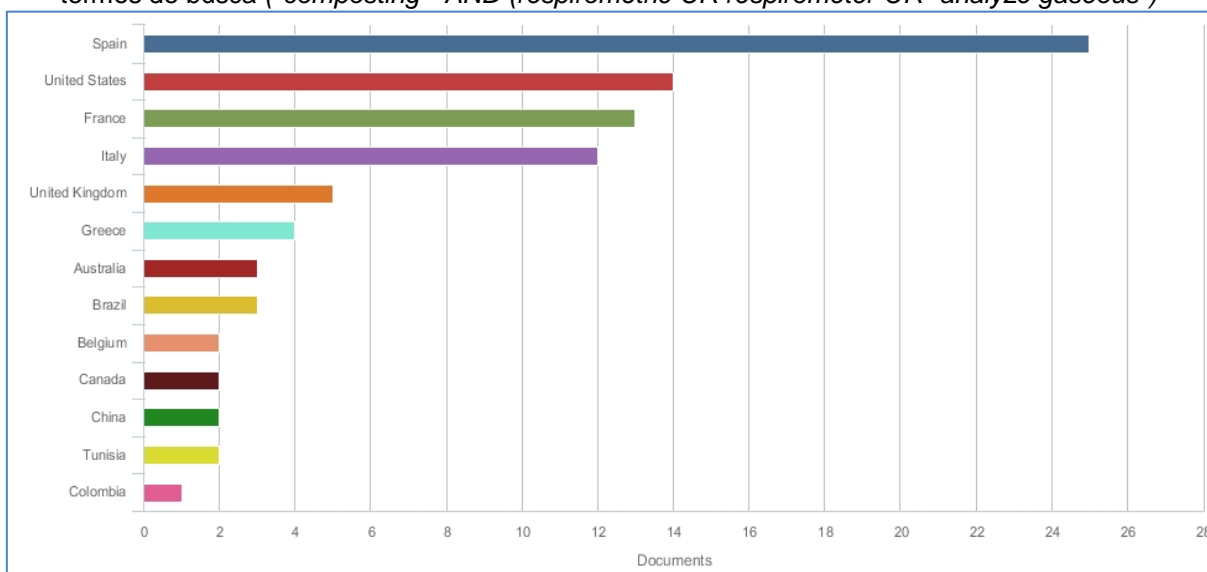
Figura 42 - Rede de periódicos com maior número de citações de trabalhos obtidos a partir da busca do termo ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

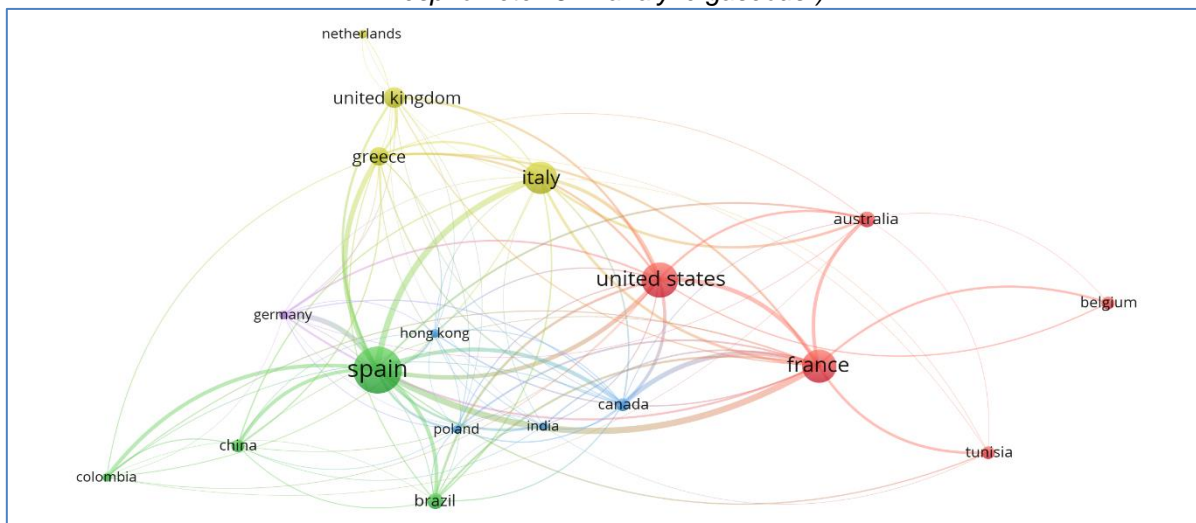
Os países que mais estão desenvolvendo pesquisas sobre o tema são a Espanha (25 artigos), Estados Unidos (14 artigos), França (13) e Itália (12), conforme Gráfico 39. Estes também representam o cento das redes de relacionamento dos autores sobre este tema (Figura 43). O Brasil aparece com 3 artigos publicados.

Gráfico 39 - Países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

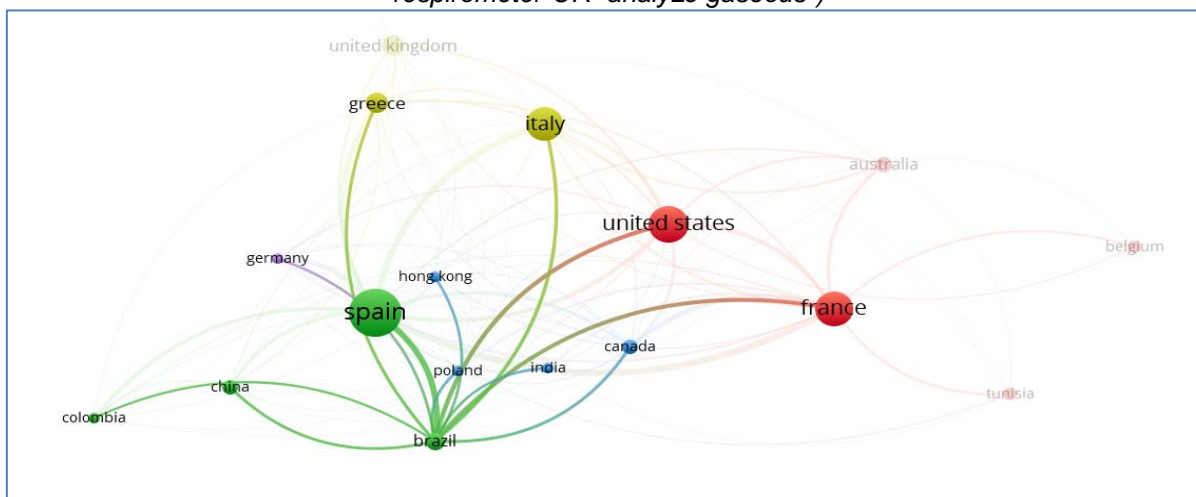
Figura 43 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

O relacionamento de autores brasileiros com os demais autores mundiais ocorre em maior proporção com espanhóis, americanos, franceses, gregos e italianos, além de outras citações em menor quantidade de chineses, indianos, poloneses, alemães e canadenses (Figura 44).

Figura 44 - Rede de relacionamento entre autores de países que apresentaram maior quantidade de artigos publicados, obtidos a partir dos termos de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))

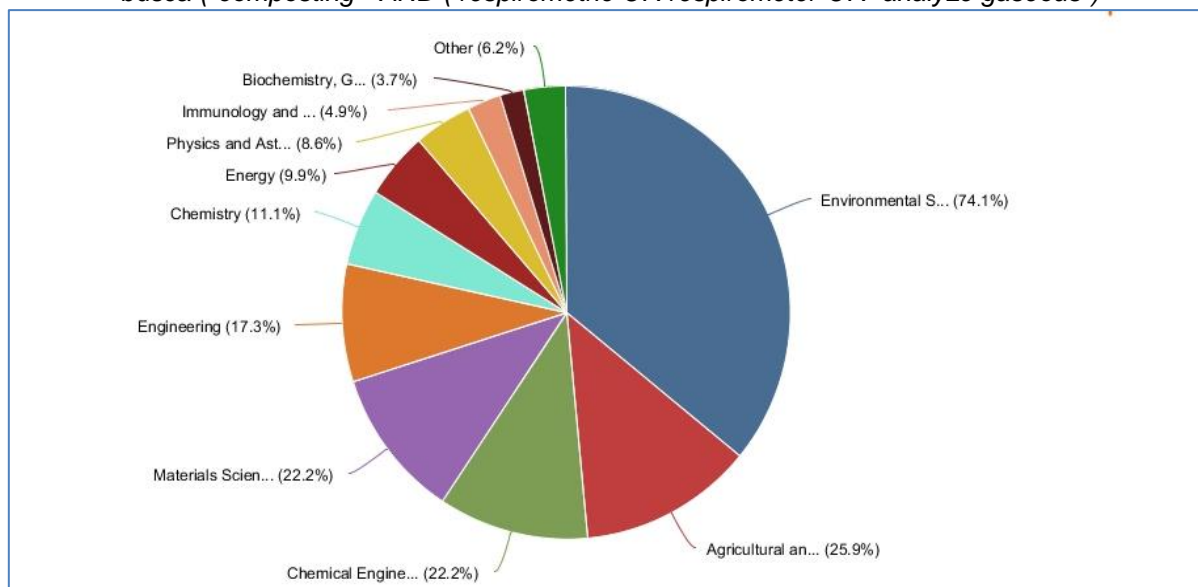


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

No Gráfico 40 se observa as áreas de conhecimento envolvidas a partir do tema de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*")). Verifica-se que permanece a maior quantidade de artigos publicados por áreas do conhecimento, as áreas de meio ambiente, em 74,1% dos artigos e na

agricultura com 25,09 %. Mas pode-se notar também a multidisciplinariedade do tema, envolvendo muitas outras áreas do conhecimento, como: Química, Bioquímica, Engenharia Química Energia, Física, Engenharia, Ciências dos Materiais, Imunologia, entre outras.

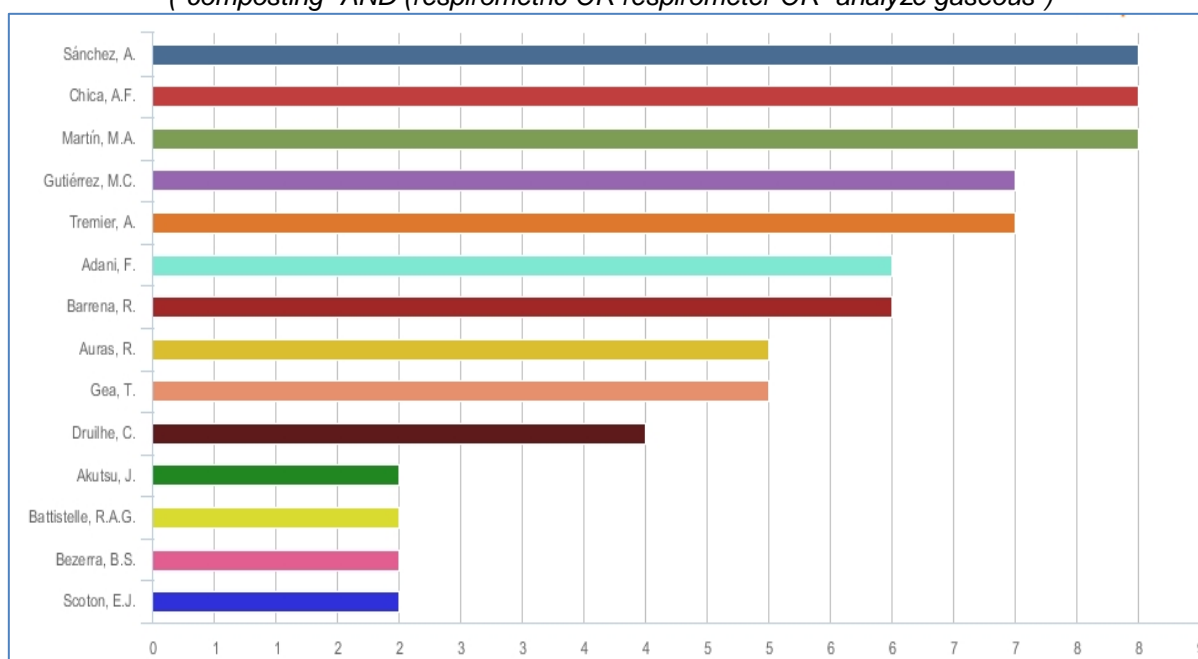
Gráfico 40 - Percentual de artigos publicados por áreas do conhecimento, obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*.

O Gráfico 41 exibe os autores com maior quantidade de artigos publicados obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*")):

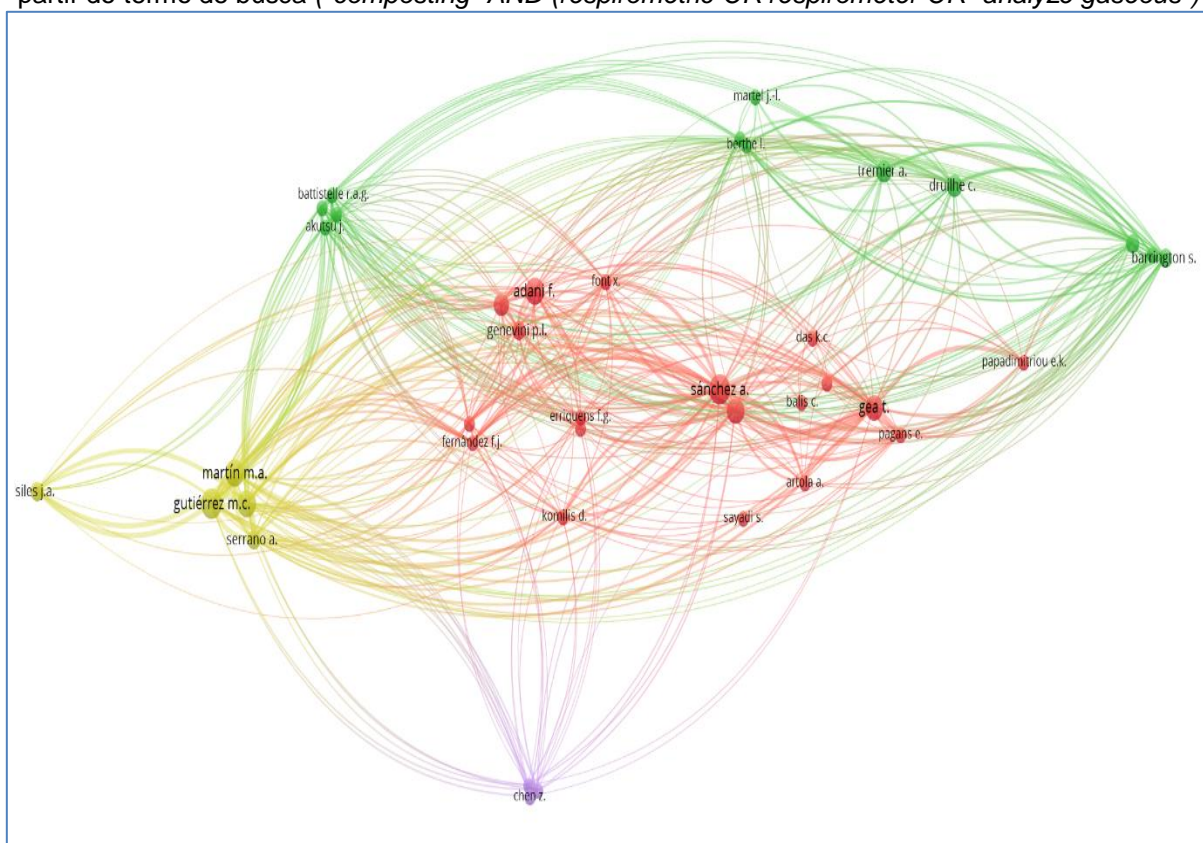
Gráfico 41 - Autores com maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Observa-se que Sanchez, A, Chica, A.F., Martin M.A, (ambos com 8 artigos), Gutierrez, M. C. e Tremier, A (ambos com 7 artigos) e Adani, F e Gea, T (com 6 artigos), estão à frente das pesquisas sobre o tema, sendo também os pontos de convergência das redes de relacionamento (Figura 45).

Figura 45 - Rede de autores que apresentaram maior quantidade de citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*"))

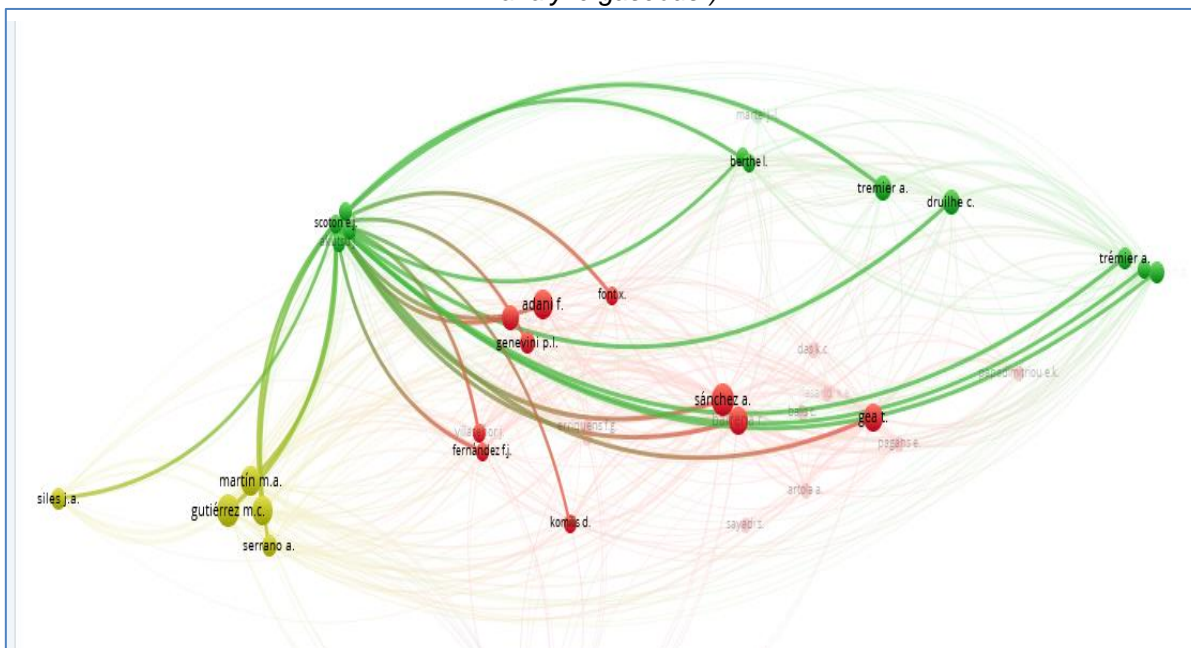


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Também os autores Scoton, E.J, Battistelle, R.A.G., Bezerra, B.S. e Akutsu, J, com dois trabalhos publicados, "*A sewage sludge co-composting process using respirometric monitoring method in hermetic rotary reactor*" e "*Parameters evaluation of the co-composting of sewage sludge and grass clippings using the respirometric method*" são os representantes no Brasil e na América do Sul que apresentam pesquisas relacionadas ao tema de busca.

Assim o relacionamento brasileiro com outras redes, que é apresentado na Figura 46, são as fontes que os trabalhos destes autores citaram.

Figura 46 - Rede de autores da Unesp com autores de outros países, que apresentaram citações de artigos, obtidos a partir do termo de busca ("*composting*" AND (*respirometric* OR *respirometer* OR "*analyze gaseous*").



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados coletados da *Scopus*

Este protagonismo dos autores brasileiros citados, nesta área de pesquisa, faz com que o presente trabalho tenha muita importância para consolidação da Faculdade de Engenharia de Bauru, como difusor do conhecimento sobre a análise da compostagem pelo método respirométrico em reator rotatório hermético.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos iniciais para avaliação do método “respirométrico” foram conduzidos nas instalações originais do projeto piloto de compostagem nas dependências do laboratório de resíduos sólidos da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Bauru, o qual passou por reformulações, como a troca do tambor rotativo, além de manutenções que foram necessárias nos demais equipamentos, devido ao período em que ficou inativo.

Na Figura 47 é apresentada a estrutura geral dos equipamentos do processo de análise experimental de compostagem de resíduos sólidos, pelo método “respirométrico”, e que foram utilizados na presente pesquisa.

Figura 47 - Estrutura do processo de experimentos de compostagem formada basicamente por: tambor rotativo, analisador de gases e aquisição de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

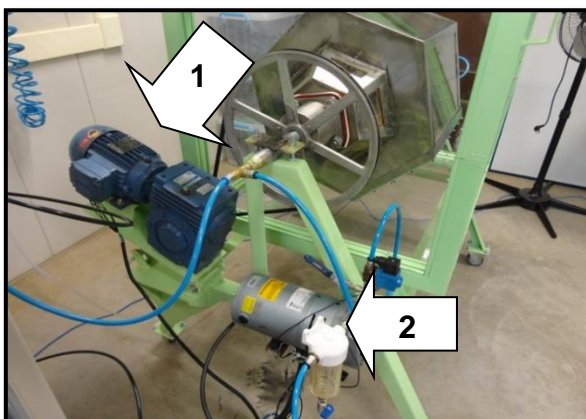
Os equipamentos utilizados foram: um tambor rotativo, acoplado dentro de uma caixa fechada com vidros, para minimizar o odor característico do processo, assim permitir a visualização do mesmo; um analisador de gases e um microcomputador para aquisição dos dados e o controle do tambor rotativo, sendo que cada uma destas etapas são interligadas e dependentes.

Na Figura 47 está apresentado o tambor rotativo, fabricado em aço inox, possui um volume útil de 90,1 litros, tem um eixo tubular que serve como suporte para transmissão da rotação e, ao mesmo tempo, possui entrada e saída dos gases.

Conta ainda com dois conjuntos de sopradores (bombas de ar), um destinado à alimentação do reator e outro destinado à recirculação. Apresenta também em uma de suas paredes, uma janela removível para manuseio das amostras.

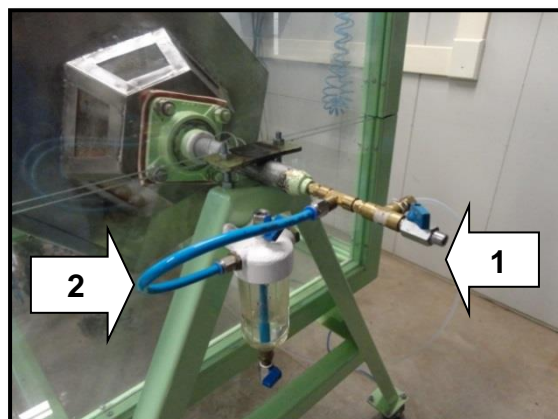
As Figuras de 48 a 51 detalham os equipamentos acoplados a esta instalação, um motor responsável para rotação do reator, entrada de ar, além de detalhes do interior do reator, onde se observa as entradas e saídas de ar.

Figura 48 - (1) Motor para rotação do reator e (2) bomba de purga



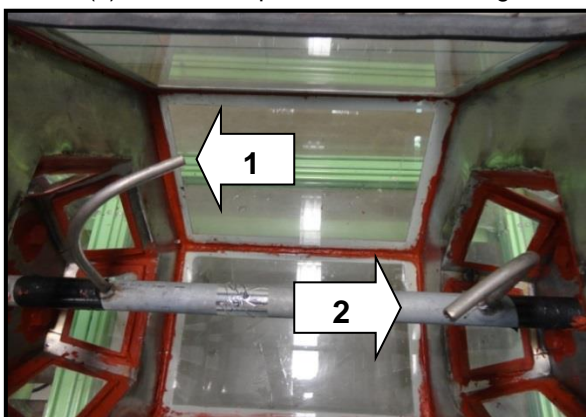
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - (1) Entrada de ar com passagem por (2) filtro



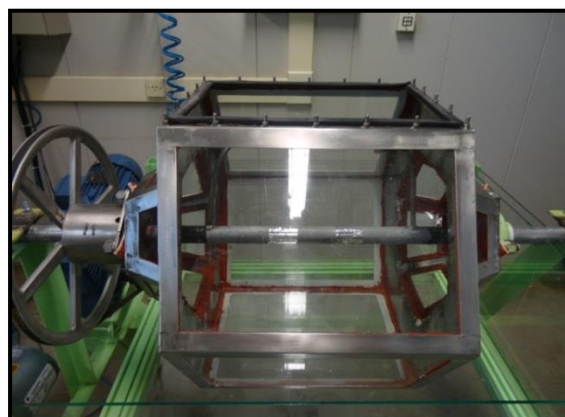
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Interior do tambor rotativo, (1) entrada de ar e (2) saída de ar para o analisador de gás



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Exterior do tambor rotativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na quinta batelada do experimento este reator foi substituído por um reator de grande porte (Figuras 52 a 56), também hermético e rotativo, mas com capacidade para 974,3 litros, mas com as demais configurações idênticas às apresentadas no reator anterior.

Neste modelo foi dispensada a caixa de proteção, pois por estar em ambiente aberto, não há o problema de odor, já que o mesmo é dispersado pela ventilação natural do ambiente.

Com este reator, buscou-se utilizar o método respirométrico no acompanhamento de compostagem de uma forma o mais próximo possível das condições operacionais reais.

Figura 52 - Tambor rotativo hermético com capacidade para 974,3cm<sup>3</sup>



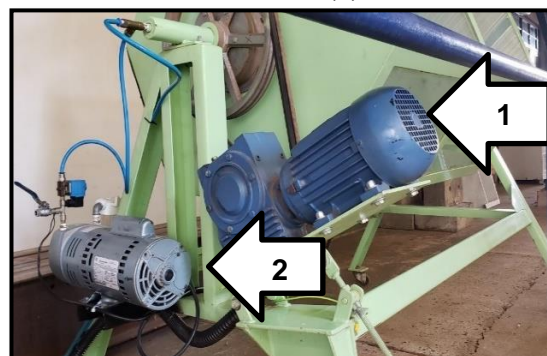
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53 - Visão geral do reator de compostagem de grande porte



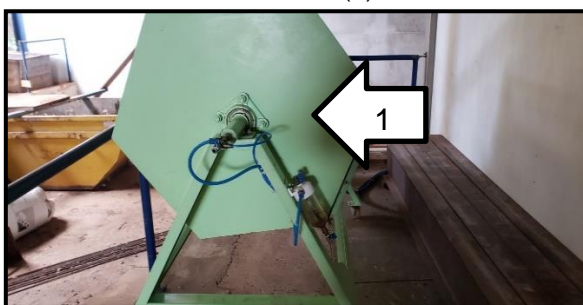
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Disposição do motor(1), bomba de vácuo(2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Lateral do reator, retorno do ar analisado(1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 56 - Interior do tambor rotativo, destaque para saída de ar para análise(1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conectados à linha de recirculação, a montagem piloto conta com um sistema completo de coleta e análises automatizada dos gases O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. O aparelho

medidor apresenta-se na Figura 57, um dispositivo modelo S710, fabricado pela empresa *Sick Maihak*, apresenta em seu *display* (Figura 57) e registra os valores de concentração desses gases em termos percentuais (%O<sub>2</sub> e %CO<sub>2</sub>).

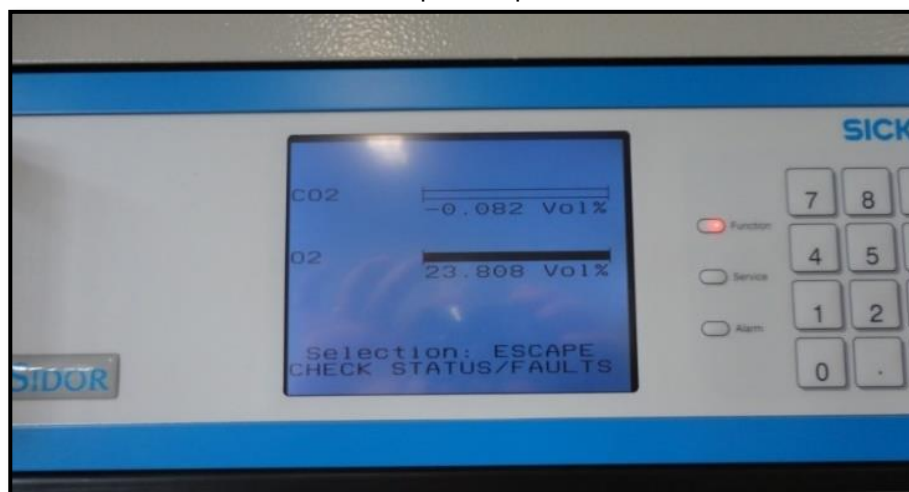
Figura 57 - Analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa *Sick Maihak*



Fonte: Elaborado pelo autor.

A apresentação de opções de coleta e registro de dados pode ocorrer em intervalos de 1s a 600s. Nos experimentos, o intervalo de coleta de dados do aparelho foi ajustado para 60s, ou seja, 1 minuto. Nesses termos, o aparelho registra por dia um total de 1.440 dados (Figura 58).

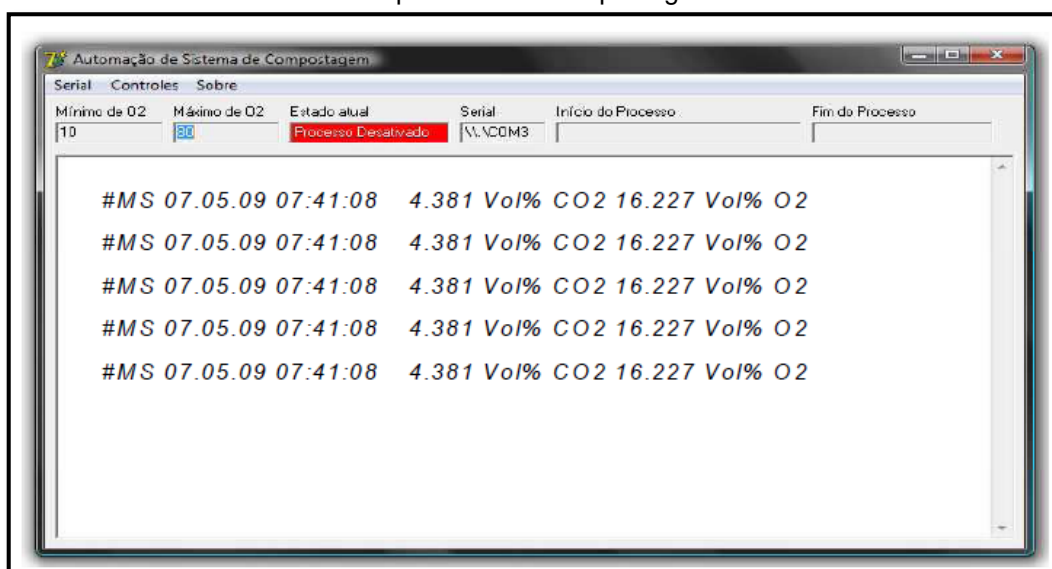
Figura 58 - Detalhe do *display* do analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa *Sick Maihak*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este equipamento tem uma interface de comunicação serial que envia os valores medidos consecutivamente, em períodos específicos de tempo a um computador que recebe de forma “*on line*”, Figura 59.

Figura 59 - Detalhamento da tela principal do software desenvolvido, onde existem as opções de controle a uma tela que mostra em tempo real as variações de gases do processo de compostagem



Fonte: Martins *et al.*, 2009.

Na Figura 60 está apresentada a *string* de dados fornecida ao computador, em cada envio de dados, ou seja, nos experimentos estes dados foram programados para serem enviados de minuto a minuto.

Os caracteres apresentados na Figura 8 indicam os seguintes dados:

- a) #MS: indicador (*header*) de resultados da análise do S710 em operação;
- b) 07.02.19: data do envio dos dados;
- c) 15:41:08: hora do envio dos dados;
- d) 4.381 Vol% CO<sub>2</sub>: medida de CO<sub>2</sub> em Vol%;
- e) 16.227 Vol% O<sub>2</sub>: medida do O<sub>2</sub>.

De acordo com os níveis percentuais de concentrações dos gases, o *software* controla um mecanismo de *hardware* que permite injetar uma concentração desejada e pré-estabelecida de ar no interior do reator, para o consumo das bactérias envolvidas na degradação dos resíduos (Figura 60). Nesta pesquisa trabalhou-se com níveis de O<sub>2</sub> entre 5% e 20%.

Figura 60 - Aquisição de dados pelo computador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se por meio da Figura 61 que a estrutura dos dados recebidos tem um formato de texto (TXT), que pode ser importado diretamente por outros softwares, como editores de textos, planilhas eletrônicas ou *softwares* de processamento matemático e, conseqüentemente, construção e análise por meio de Gráficos.

Figura 61 - Exemplo do relatório de dados gerado pelo *software*, onde o arquivo pode ser importado por editores de textos e planilhas.

```
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
```

Fonte: Martins *et al.*, 2009.

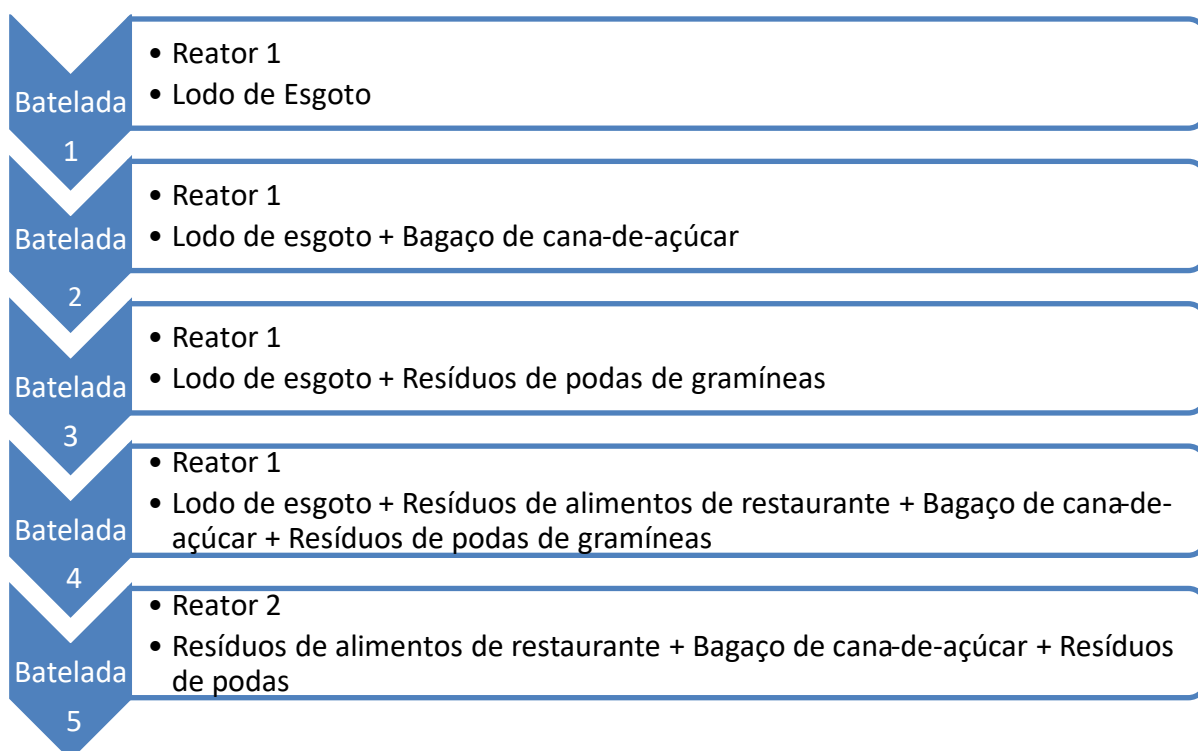
Utilizou-se o *software* livre *TeamViewer 7*, que permite que através de conexões de rede, o acesso e o compartilhamento de dados entre dois computadores conectados pela internet, para acompanhamento à distância do processo, podendo inclusive intervir no ativamente do processo. Através deste aplicativo, ou de outros disponíveis, pode-se observar se o processo não sofreu interrupções, como por exemplo, em caso de queda de fornecimento de energia

elétrica, em períodos em que não há presença física no acompanhamento do processo, tais como, os períodos noturnos e finais de semana.

Os parâmetros medidos na fase gasosa consistem basicamente na determinação da evolução temporal do consumo de  $O_2$  e respectiva geração de  $CO_2$  sendo estes gases analisados e registrados pelo aparelho medidor de forma contínua. Após os ensaios de cada batelada, por meio do *software Microsoft Excel*, plotando-se os valores da evolução do consumo de  $O_2$  e respectiva geração de  $CO_2$  ao longo do processo, foram gerados gráficos para análise do experimento.

Estes materiais e métodos foram aplicados em cinco bateladas experiment, realizadas em diferentes condições e utilizando os resíduos os resíduos apresentados na Figura 62:

Figura 62 – Bateladas realizadas na pesquisa



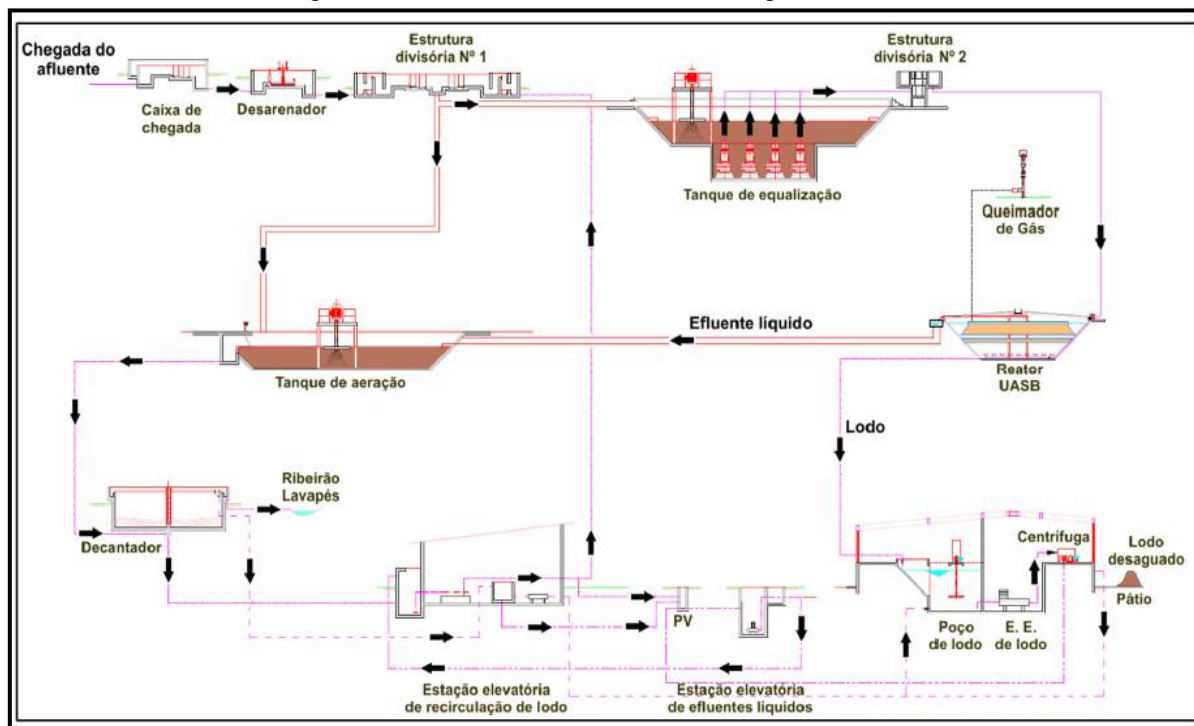
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO UTILIZADO NAS QUATRO PRIMEIRAS BATELADAS

Os lodos de esgoto utilizados nas bateladas 1 a 4 foram coletados de uma Estação de Tratamento de Esgoto - ETE, de um município do interior do estado de São Paulo, que não permitiu a sua identificação e que produz em média cerca de 12

m<sup>3</sup>/dia de lodo de esgoto úmido (80% de umidade), que são encaminhados para centrífuga afim de fazer o processo de desaguamento, resultando uma geração em torno de 360 m<sup>3</sup>/mês. Na Figura 63 é apresentado o fluxograma do sistema de tratamento modificado da ETE.

Figura 63 - Sistema de tratamento de esgoto sanitário da ETE



Fonte: Empresa operadora da ETE.

O lodo utilizado no experimento foi o lodo digerido de reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), proveniente da ETE. O sistema de tratamento por lodos ativados recebe apenas o efluente líquido dos reatores UASB e fica restrito apenas à recirculação do lodo gerado nos tanques de aeração.

As estruturas da estação de tratamento estão dispostas nas Figuras 64 a 67:

Figura 64 - Entrada do efluente para ser tratado na ETE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65 - Tanque de aeração para o tratamento aeróbio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 66 - Tanque de equalização



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 - Decantadores



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta etapa de tratamento da ETE, o efluente tratado do decantador é lançado no curso d'água e o lodo acumulado nos tanques de aeração só é retirado e encaminhado para centrífuga quando em excesso (Figuras 68 a 71).

Figura 68 - Local de recebimento do lodo para ser centrifugado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69 - Lodo recebido da ETE para centrifugação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70 - Processo de centrifugação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 71 - Lodo centrifugado, com 80% de umidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

O lodo de esgoto gerado nos reatores UASB após ser centrifugado é armazenado em caçambas e, a seguir, é transportado até o pátio de compostagem que foi desenvolvido em parceria com uma Universidade Estadual Paulista – UNESP.

A estufa de compostagem foi construída com 12,8m de largura, 81m de comprimento e 6,5m de altura, a cobertura é de filme polietileno, com espessura de 150 micras e tratamento contra raios ultravioleta, as laterais têm fechamento fixo, um lado com o mesmo material da cobertura e o outro com tela branca de malha 30% e tratamento contra raios ultravioleta (Figuras 72 a 75).

Figura 72 - Visão geral da estufa de compostagem do lodo de esgoto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73 - Processo mecanizado de revolvimento do lodo de esgoto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 74 - Disposição do lodo em duas baias, de 81m de comprimento e 12,8m de largura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75 - Lodo compostado após 60 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.1 Características Físico-Químicas do Lodo de Esgoto

De acordo com os resultados obtidos no laudo fornecido pela empresa que opera a estação de tratamento de esgotos, e pelos parâmetros de avaliação contidos na Norma NBR 10004, os resíduos da amostra em questão são classificados como RESÍDUO CLASSE II A - RESÍDUO NÃO PERIGOSO NÃO INERTE.

Nas Tabelas 12 a 16 estão discriminados os valores encontrados na amostragem do lodo de esgoto em 27/08/2013, não sendo fornecido nenhum laudo mais recente sobre o resíduo.

Tabela 12 - Laudo de Análise de Teste de Lixiviação

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
pH final	4,89
Tempo de lixiviação	18 h
Teor de sólidos secos	93%

Fonte: Empresa responsável pela ETE

Nota-se que o valor do pH final é ácido, assim, se for aplicado diretamente no solo o Al, o Fe e o Mn tornam-se mais solúveis e podem ser tóxicos para as plantas com valores próximos de 5 e ainda o teor de sólidos, próximo de 93, está dentro das informações da literatura. Os dados apresentados na Tabela 13 demonstram que a presença de inorgânicas, dentro desta amostra de lodo de esgoto, estão todos dentro dos valores máximos permitidos na legislação.

Tabela 13 - Inorgânicos

<b>Parâmetro</b>	<b>Unid</b>	<b>LQ</b>	<b>VMP</b>	<b>Incerteza<sup>4(±)</sup></b>	<b>Resultado</b>
<b>Arsênio</b>	mg/L	0,005	1,0	0,0012	<b>0,008</b>
<b>Bário</b>	mg/L	0,005	70	0,072	<b>0,471</b>
<b>Cádmio</b>	mg/L	0,001	0,5	0,00019	<b>&lt; LQ</b>
<b>Chumbo</b>	mg/L	0,005	1,0	0,00082	<b>&lt; LQ</b>
<b>Cromo</b>	mg/L	0,005	5,0	0,00066	<b>&lt; LQ</b>
<b>Fluoreto</b>	mg/L	0,100	150	0,0071	<b>0,130</b>
<b>Mercúrio</b>	mg/L	0,0002	0,1	0,000027	<b>&lt; LQ</b>
<b>Prata</b>	mg/L	0,01	5,0	0,0017	<b>&lt; LQ</b>
<b>Selênio</b>	mg/L	0,005	1,0	0,00078	<b>&lt; LQ</b>

Fonte: Empresa responsável pela ETE

Também como apresentado na Tabela 14, foi detectada a presença de vários pesticidas, e também de outras substâncias orgânicas (Tabela 15). No entanto, os valores encontrados também estão dentro dos valores máximos permitidos.

Ressalta-se que estes valores são referentes a uma única amostragem, e devido a heterogeneidade que apresenta o lodo de estação de tratamento de esgoto, estas análises necessitam ser realizadas com maior regularidade e frequência para garantir que os valores permaneçam dentro dos limites máximos permitidos.

Tabela 14 - Pesticidas

Parâmetro	Unid	LQ	VM P	Incerteza <sup>4(±)</sup>	Resultado
<b>Aldrin + Dieldrin</b>	µg/L	0,03	3,0	0,0037	<b>&lt; LQ</b>
Obs: LQ refere-se ao ensaio Aldrin e Dieldrin conforme escopo CRL0267.					
<b>Clordano (Todos os Isomeros)</b>	µg/L	0,1	20	0,013	<b>&lt; LQ</b>
Obs: Ensaio Clordano (Todos os Isomeros) refere-se a Clordano conforme escopo CRL0267.					
<b>DDT (p,p 'DDT+p,p 'DDD+p,p 'DDE)</b>	µg/L	0,1	200	7 0,009	<b>&lt; LQ</b>
Obs: LQ refere-se a DDT conforme escopo CRL0267.					
<b>2,4 D</b>	µg/L	0,05	3000	0,0056	<b>&lt; LQ</b>
<b>Endrin</b>	µg/L	0,03	60	0,0032	<b>&lt; LQ</b>
<b>Heptacloro e seus epóxidos</b>	µg/L	0,03	3,0	0,0041	<b>&lt; LQ</b>
Obs: LQ refere-se ao ensaio Heptacloro e Heptacloro Epoxido conforme escopo CRL0267.					
<b>Lindano</b>	µg/L	0,1	200	9 0,009	<b>&lt; LQ</b>
Obs: Ensaio Lindano refere-se a Lindano (g-BHC) conforme escopo CRL0267.					
<b>Metoxicloro</b>	µg/L	0,1	2000	0,0037	<b>&lt; LQ</b>
<b>Pentaclorofenol</b>	µg/L	0,05	900	0,0064	<b>&lt; LQ</b>
<b>Toxafeno</b>	µg/L	0,01	500	0,00046	<b>&lt; LQ</b>
<b>2,4,5 T</b>	µg/L	0,05	200	0,0050	<b>&lt; LQ</b>
<b>2,4,5 TP</b>	µg/L	0,05	1000	0,0017	<b>&lt; LQ</b>

Fonte: Empresa responsável pela ETE

Tabela 15 - Outros Orgânicos

Parâmetro	Unid	LQ	VMP	Incerteza <sup>4(±)</sup>	Resultado
<b>Benzeno</b>	µg/L	1,0	500	0,11	<b>&lt; LQ</b>
Parâmetro	Unid	LQ	VMP	Incerteza <sup>4(±)</sup>	Resultado
<b>Cloreto de Vinila</b>	µg/L	0,5	500	0,065	<b>&lt; LQ</b>
<b>Clorofórmio</b>	µg/L	1,0	6000	0,11	<b>&lt; LQ</b>
<b>Cresol Total</b>	µg/L	0,3	200.000	0,036	<b>&lt; LQ</b>
<b>O-Cresol</b>	µg/L	0,1	200.000	0,012	<b>&lt; LQ</b>
<b>M+P-Cresol</b>	µg/L	1,0	200.000	0,10	<b>&lt; LQ</b>

Obs: LQ refere-se ao ensaio m-Cresol e p-Cresol conforme escopo CRL0267.

<b>1,4 Diclorobenzeno</b>	µg/L	0,05	7500	0,0069	< LQ
<b>1, 2 Dicloroetano</b>	µg/L	1,0	1000	0,079	< LQ
<b>1,1 Dicloroetano</b>	µg/L	1,0	3000	0,084	< LQ
<b>2,4 Dinitrotolueno</b>	µg/L	0,05	130	0,0018	< LQ
<b>Hexaclorobenzeno</b>	µg/L	0,1	100	0,013	< LQ
<b>Hexaclorobutadieno</b>	µg/L	0,05	500	0,0063	< LQ
<b>Hexacloroetano</b>	µg/L	0,5	3000	0,061	< LQ
<b>Metiletilcetona</b>	µg/L	1,0	200.000	0,034	< LQ
<b>Nitrobenzeno</b>	µg/L	0,05	2000	0,0066	< LQ
<b>Piridina</b>	µg/L	0,05	5000	0,0017	< LQ
<b>Tetracloroeto de Carbono</b>	µg/L	1,0	200	0,077	< LQ
<b>Tetracloroetileno</b>	µg/L	1,0	4000	0,093	< LQ

Fonte: Empresa responsável pela ETE

#### LEGENDA PARA AS TABELAS 12 a 15.

**Unid:** unidade; **LD:** limite de detecção; **LQ:** limite de quantificação; **NA:** não aplicável; **VMP:** valor máximo permitido; **NMP:** número mais provável; **UFC:** unidade formadora de colônia; **NI:** não informado;

\* Repetido e Confirmado

Ensaio sem identificação de legenda são acreditados NBR ISO-IEC 17025:2005

1- Ensaio não acreditado realizado pelo ASL - Análises Ambientais 2- Ensaio subcontratado acreditado NBR ISO-IEC 17025:2005 3- Ensaio subcontratado não acreditado 4- A incerteza (U) relatada é baseada na incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência k=2, para um nível de confiança de 95%

Ribeiro (2018), em análises laboratoriais com o lodo de esgoto da mesma estação de tratamento (Tabela 16), aponta entre outras, as características de pH com valor de 6,8, diferente dos valores encontrados nas análises de 2013 (4,89), umidade 80% e a relação C/N com valor de 8/1, valores estes que se encontram dentro dos valores médios para o lodo de esgoto, de acordo com a literatura.

Tabela 16 - Caracterização química do lodo de esgoto utilizado no processo de compostagem

Característica	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	S	Um	C-Total
	----- ** porcentagem ao natural -----							
Valores	0,8	0,7	ND	0,2	ND	0,5	80	6
Característica	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N	pH
	-----**mg kg <sup>-1</sup> ao natural-----						ao natural	
Valores	82	36	27	60	58	108	8/1	6,8

\*\*Teores totais. ND = não detectado < 0,1% ou < mg kg<sup>-1</sup>.

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Ribeiro (2018).

Também foi realizado teste para determinação da Demanda Química de Oxigênio - DQO, no Laboratório de Análises de Efluentes na Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista, sendo encontrado o valor de  $1.603,1\text{mg/L}^{-1}$ ., também dentro dos padrões aceitáveis para o resíduo.

### 3.1.2 Determinação da Umidade do Lodo de Esgoto

Após a secagem do lodo de esgoto, foi aferida a umidade do mesmo por meio de aquecimento em estufa pelo período de 24 horas, em temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  (Figuras 76 a 79), fazendo-se a média das diferenças de massas encontradas em três Cápsulas de análise.

Figura 76 - Pesagem das Cápsulas com lodo de esgoto



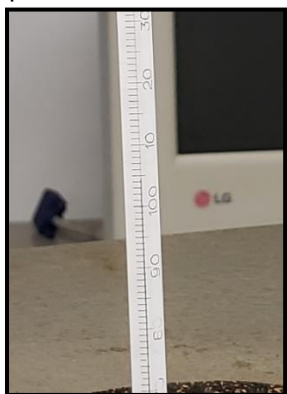
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 77 - Avaliação da umidade por aquecimento em estufa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 78 - Aferição da temperatura da estufa em  $105^{\circ}\text{C}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 79 - Finalização do processo de avaliação da umidade, após 24h em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após realização da análise, verificou-se que o lodo de esgoto da ETE apresentava 83% de umidade, conforme apresentado na Tabela 17, dentro do que verifica-se nas referências bibliográficas.

Tabela 17 - Determinação da umidade do lodo de esgoto coletado na ETE

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	26,33	63,96	37,63	31,34	6,29	83%
M60	29,92	77,34	47,42	39,5	7,92	83%
M95	27,47	68,85	41,38	34,46	6,92	83%
Média						83%

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados após os experimentos realizados nas cinco bateladas estão apresentados a seguir:

### 4.1 RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA BATELADA

Na primeira batelada utilizou-se somente o lodo de esgoto, na tentativa de reproduzir o processo realizado na ETE que produz o lodo de esgoto, na qual não é adicionado nenhum resíduo no processo de compostagem, ou seja, apenas o lodo de esgoto, porém em um reator hermético rotativo, sendo utilizado o total de 14,109kg de lodo, em um volume de 20 litros.

Devido a alta umidade em torno de 80%, o lodo centrifugado, foi submetido a processo de secagem ao ar livre por uma semana, em ambiente protegido de chuvas, conforme apresentado nas figuras 80 a 83.

Figura 80 - Lodo disposto em bandeja para secagem ao ar livre



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 81 - Início do processo de secagem do lodo de esgoto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 82 - Processo de secagem em seu estágio intermediário



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 83 - Resultado final do processo de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a secagem, verificou-se a umidade, por meio do mesmo processo utilizado na determinação da umidade inicial do lodo, sendo encontrada agora uma umidade média de 9,4%, conforme verifica-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na primeira batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	26,33	45,46	19,13	43,73	17,4	9
M60	29,92	49,14	19,22	47,14	17,22	10,4
M95	27,47	49,4	21,93	47,45	19,98	8,9
Média						<b>9,4%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir o lodo passou por uma análise granulométrica, por meio de um conjunto de peneiras, conforme Figura 84:

Figura 84 - Processo de peneiração para obtenção da granulometria do lodo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 19 está apresentada a massa da distribuição granulométrica utilizando-se as peneiras descritas em mm, e Figura 85 as imagens desta distribuição.

Tabela 19 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na primeira batelada

Peneira (mm)	Massa(kg)
25	0,02
19	0,07
12,5	0,880
9,5	1,020
4,8	0,895
Fundo	0,420
<b>Total</b>	<b>3,305</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 85 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da primeira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor

Depois de verificada a granulometria, o lodo foi depositado no reator hermético rotativo, que foi fechado para o início do processo de compostagem, no dia 10 de setembro de 2018, a uma temperatura ambiente de 23,6° C, conforme apresentado nas Figuras 86 a 89.

Figura 86 - Disposição do lodo no reator para início do processo de compostagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 87 - Disposição do lodo e proteção da saída e entrada de ar para evitar entupimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 88 - Reator fechado para evitar entrada e saída de gases



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 89 - Início do processo de rotação do reator, na primeira batelada

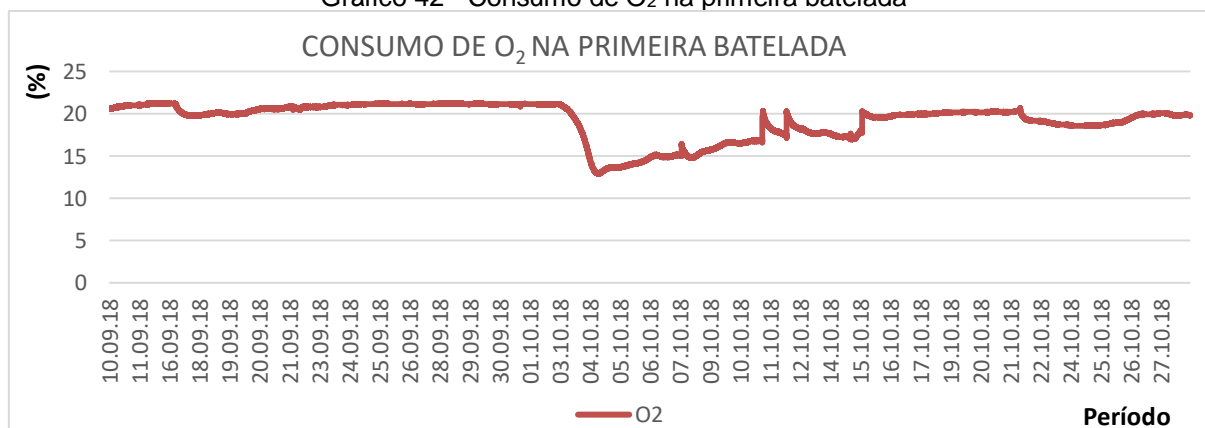


Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação C/N nesta batelada ficou limitada somente a relação do lodo de esgoto, ou seja, 8/1, descrita anteriormente.

O processo se desenvolveu no período de 10 de setembro a 29 de outubro de 2018, num total de 50 dias, sendo geradas 64.205 linhas de dados, informando consumo de  $O_2$  e a emissão de  $CO_2$ , resultante do processo de decomposição de matéria orgânica. No Gráfico 42 estão apresentados os valores que podem concluir que o consumo de  $O_2$  praticamente não ocorreu nos primeiros 20 dias do processo, sendo necessário verificar a umidade, conforme apresentado na Tabela 20.

Gráfico 42 - Consumo de  $O_2$  na primeira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

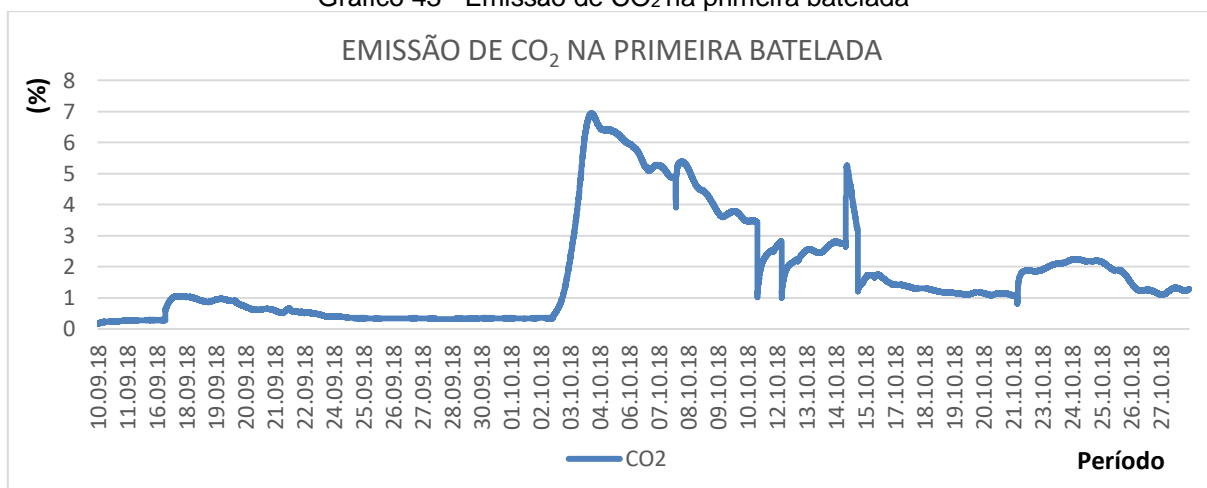
Tabela 20 - Primeira determinação da umidade do composto da primeira batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	26,33	42,21	15,88	36,22	9,89	37,7
M60	29,92	37,71	7,79	34,72	4,8	38,38
M95	27,47	40,97	13,5	36,07	8,6	36,3
Média						37,47%

Fonte: Elaborado pelo autor.

No dia 30 de setembro de 2018, foram adicionados 500ml de água, na tentativa de aumentar a umidade que estava em 37,47%, abaixo do ideal entre 50% e 60%, conforme Pereira Neto (1996).

Como pode ser verificado pelo Gráfico 43, a alteração surtiu efeito, dando início a uma produção de CO<sub>2</sub> que chegou a 7% no dia 03 de outubro, porém começou a cair novamente, praticamente parando de produzir CO<sub>2</sub> no dia 10 de outubro.

Gráfico 43 - Emissão de CO<sub>2</sub> na primeira batelada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizou-se então uma segunda análise da umidade, conforme apresentado na Tabela 21, chegando-se a uma umidade de 42,7% e, na tentativa de reativar o processo, foi adicionado nova quantidade de 500ml de água no dia 13 de outubro de 2018.

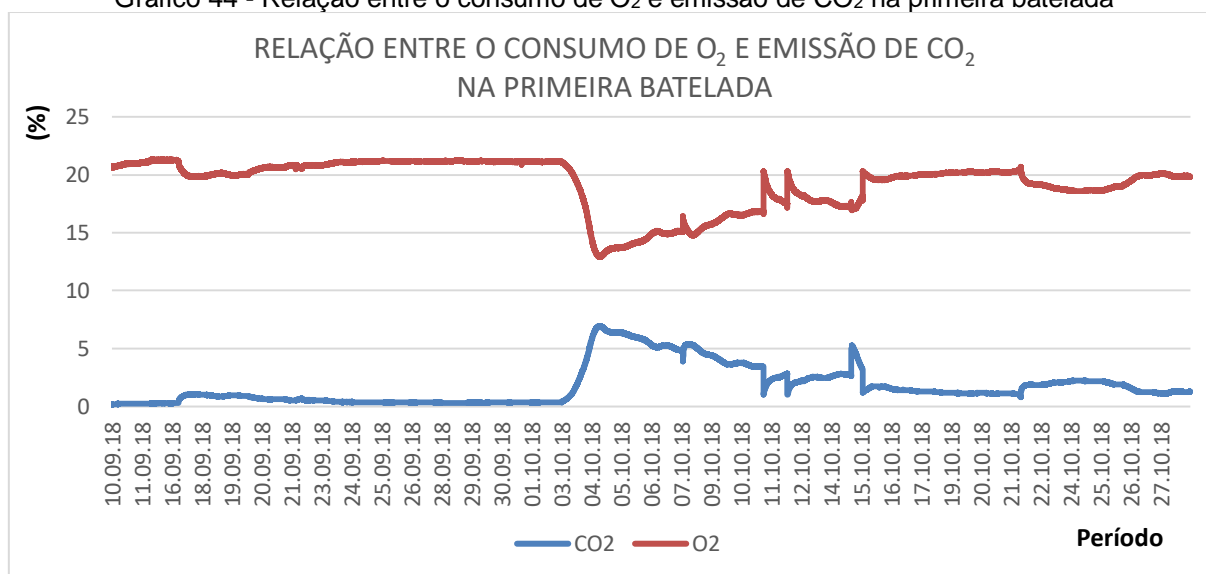
Tabela 21 - Segunda determinação da umidade do composto da primeira batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	23,23	34,46	11,23	29,7	6,47	42,4
M22	31,37	37,63	6,26	34,98	3,61	42,3
M60	27,43	40,54	13,11	34,87	7,44	43,2
Média						42,7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se que nos dias 14 e 15 de outubro o processo voltou à produção de  $\text{CO}_2$  e consequente consumo de  $\text{O}_2$ , como observamos ao analisarmos o Gráfico 44.

Gráfico 44 - Relação entre o consumo de  $\text{O}_2$  e emissão de  $\text{CO}_2$  na primeira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém o processo de decomposição não se manteve, sendo encerrado em 29 de outubro de 2018.

O que se observou com o composto é que o mesmo acabou se transformando em grumos densos, provavelmente devido ao movimento de rotação do reator (Figuras 90 e 91). Outro fator importante é que a granulometria do lodo, ao receber a umidade, transforma o lodo novamente em material pastoso e a granulometria perde suas características físicas. Esta densidade levou à falta de espaços internos no composto, impedindo a oxigenação do mesmo e levando a falta de decomposição biológica.

Figura 90 - Resultado da primeira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 91 - Composto gerado na primeira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

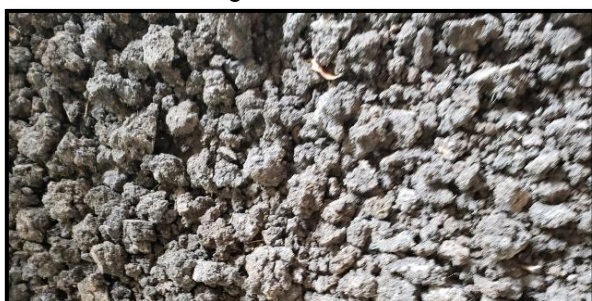
Devido à disposição física na forma de grumos compactados, nesta batelada não foi colhido amostras para análise de macronutrientes e matéria orgânica.

## 4.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SEGUNDA BATELADA

Nesta batelada utilizou-se o lodo de esgoto em processo de co-compostagem com o bagaço de cana-de-açúcar (Figuras 92 e 93), visando diminuir a umidade, melhorar a relação C/N, pois caso essa relação seja maior do que 30/1, a fermentação não ocorre devido à falta de nitrogênio para sintetizar as proteínas e os microrganismos terão seu desenvolvimento prejudicado. Por outro lado, se o valor de C/N for menor do que 30, o excesso de nitrogênio pode resultar na volatilização de amônia, e também para aumentar a granulometria do processo.

A relação C/N do lodo de esgoto, como vista, é de 8/1 e do bagaço de cana-de-açúcar é 22/1 em média, segundo Russo (2003).

Figura 92 - Lodo após secagem utilizado na segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 93 - Bagaço de cana-de-açúcar utilizado na segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir verificou-se a umidade dos dois resíduos, apresentados nas Tabela 22 e 23, obtendo-se os resultados de 16,3% do lodo esgoto e de 9,7% do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 22 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na segunda batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M22	25,97	59,2	33,23	53,61	27,64	16,8
M95	27,47	63,68	36,21	58	30,53	15,7
Média						16,3%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 - Determinação da umidade do bagaço da cana de açúcar utilizado na segunda batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	M17	26,23	34,56	8,33	33,81	9,0
M60	M60	27,43	34,01	6,58	33,33	10,3
Média						9,7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a verificação da umidade, verificou-se a granulometria do lodo de esgoto, utilizando-se o sistema de peneiras, perfazendo um total de 5,015kg, distribuídos conforme dados apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na segunda batelada

Peneira (mm)	Massa(kg)
25	0,165
19	0,830
12,5	1,75
9,5	0,565
4,8	0,890
Fundo	0,815
<b>Total</b>	<b>5,015</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 94 é apresentada a distribuição granulométrica do lodo de esgoto, após o processo de peneiramento.

Figura 94 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

O bagaço de cana-de-açúcar também passou por um sistema de análise granulométrica, porém com peneiras com malhas de menos milímetros de espessura, obtendo-se o total de 0,394kg, resultado distribuído granulometricamente na Tabela 25 e demonstrado conforme apresentado na Figura 95.

Tabela 25 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na segunda batelada

Peneira (mm)	Massa(kg)
4,8	0,04
2,4	0,076
1,2	0,131
0,6	0,063
0,3	0,022
0,15	0,014
Fundo	0,048
<b>Total</b>	<b>0,394</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 95 - Granulometria dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dois resíduos foram misturados, perfazendo um total de 5,409kg (Tabela 26), e depositados no reator conforme as Figuras 96 e 97, numa temperatura ambiente de 26,7°C, iniciando o processo em 15 de fevereiro de 2019.

Tabela 26 - Total de resíduos utilizados na segunda batelada

Resíduo	Massa(kg)
Lodo de esgoto	5,015
Bagaço de cana-de-açúcar	0,394
<b>Total</b>	<b>5,409</b>

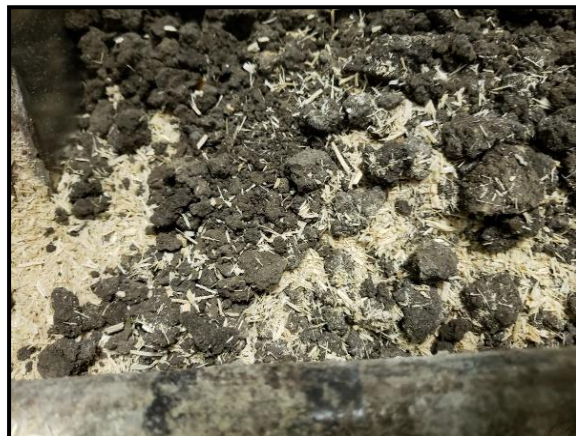
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 96 - Segunda batelada, co-compostagem de lodo de esgoto e bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 97 - Início do processo de compostagem da segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda batelada teve início em 15 de fevereiro e finalizou-se em 9 de março de 2019, num total de 23 dias, sendo geradas 29.951 linhas de dados, informando consumo de  $O_2$  e a emissão de  $CO_2$ , resultante do processo de decomposição de matéria orgânica.

Como se verifica pelo curto tempo de decomposição, o processo foi interrompido devido à formação de um grande e único grumo denso do composto, como observado pela Figura 98, impedindo qualquer tipo intervenção que pudesse prosseguir compostando.

Figura 98 - Resultado da segunda batelada

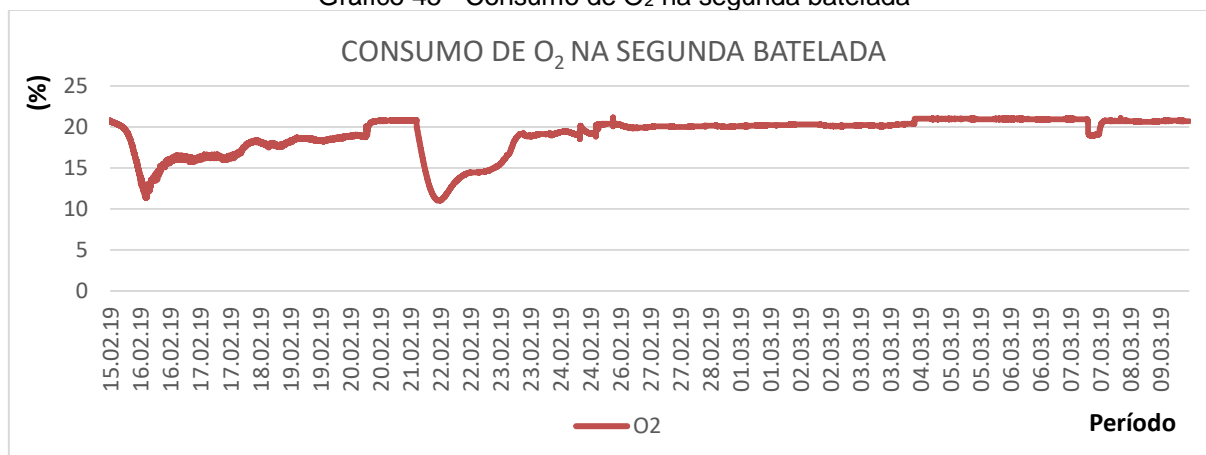


Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 45 pode ser observado que o consumo de  $O_2$  teve início muito mais rápido que na batelada anterior, com apenas dois dias do processo o consumo estava próximo de 9%, provavelmente devido à presença do bagaço de cana-de-

açúcar que diminuiu um pouco a umidade a aeração. Porém este consumo diminuiu muito e também rapidamente, em quatro dias, chegando aos valores iniciais.

Gráfico 45 - Consumo de O<sub>2</sub> na segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Interagindo no sistema no dia 21 de fevereiro de 2019, verificou-se a umidade, conforme pode ser observado por meio da Tabela 27, estando próxima de 43,1%, sendo acrescentado 500ml de água.

Tabela 27 - Determinação da umidade do composto da segunda batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	23,23	34,45	11,22	29,7	23,23	42,3
M22	31,57	37,63	6,06	34,98	31,57	43,7
M60	27,43	40,54	13,11	34,87	7,44	43,2
Média						43,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se no Gráfico 46, que novamente o processo iniciou uma produção de CO<sub>2</sub>, próxima de 8%, porém em 3 dias o processo não mais teve decomposição bacteriana, tendo sido finalizado no dia 09 de março de 2019.

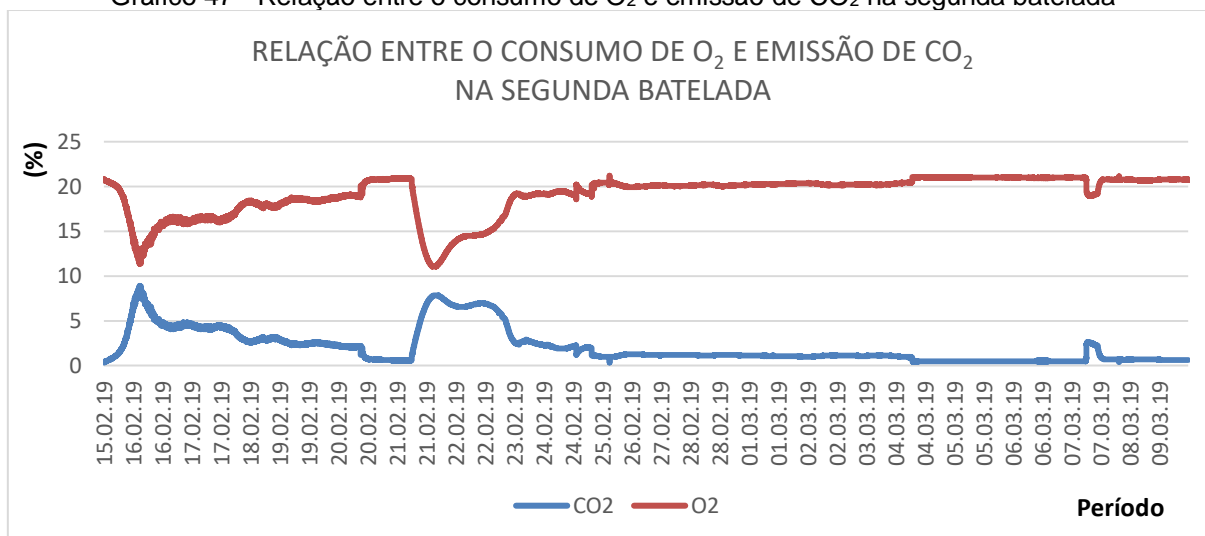
Gráfico 46 - Emissão de CO<sub>2</sub> na segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 47 é apresentado o relacionamento entre consumo de O<sub>2</sub> e emissão de CO<sub>2</sub>, sendo sempre um inversamente proporcional ao outro.

Gráfico 47 - Relação entre o consumo de O<sub>2</sub> e emissão de CO<sub>2</sub> na segunda batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final do processo, o material foi colhido e depois de seco em temperatura ambiente foi reservado em material hermético para análise de macronutrientes e matéria orgânica

#### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS NA TERCEIRA BATELADA

Os resíduos utilizados na terceira batelada tiveram a substituição do bagaço da cana-de-açúcar pelos resíduos de podas de gramíneas secas (Figuras 99 e 100), onde buscou-se aumentar a granulometria do processo, possibilitado pelo aumento da granulometria das gramíneas, e também a relação C/N, pois a gramíneas secas possuem uma relação C/N com valor médio de 31/1.

Figura 99 - Lodo após secagem utilizado na terceira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 100 - Resíduos de podas de gramíneas utilizados na terceira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se a umidade dos dois resíduos, obtendo-se os resultados de 24,2% do lodo esgoto e de 8,8% do bagaço de cana-de-açúcar, apresentados nas Tabelas 28 e 29.

Tabela 28 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na terceira batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	23,24	40,05	16,81	36,1	12,86	23,5
M60	29,94	45,14	15,2	41,34	11,4	25,0
Média						<b>24,2%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 - Determinação da umidade do resíduo de poda grama utilizado na terceira batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M22	29,1	31,22	2,12	31,04	1,94	8,5
M95	27,5	30,9	3,4	30,59	3,09	9,1
Média						<b>8,8%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta terceira batelada, a granulometria foi feita apenas nos resíduos de lodo de esgoto, num total de 3,231kg distribuídos no sistema de peneiras conforme a Tabela 30,e apresentados na Figura 101, já os resíduos de poda de gramíneas, no total de 0,621 kg, devido à sua complexidade granulométrica, não foi feita esta análise.

Tabela 30 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na terceira batelada

Peneira (mm)	Massa(kg)
25	0,106
19	0,535
12,5	1,127
9,5	0,364
4,8	0,573
Fundo	0,525
<b>Total</b>	<b>3,231</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 101 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da terceira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dois resíduos foram misturados, perfazendo um total de 3,852kg (Tabela 31), e depositados no reator conforme as Figuras 102 e 103, com início do processo em 17 de julho de 2019, numa temperatura ambiente de 25,3°C.

Tabela 31 - Total de resíduos utilizados na terceira batelada

Resíduo	Massa(kg)
Lodo de esgoto	3,231
Resíduos de poda de gramíneas	0,621
<b>Total</b>	<b>3, 852</b>

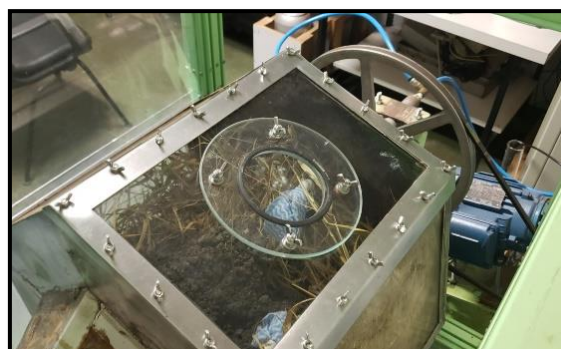
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 102 - Resíduos de lodo de esgoto e poda de gramíneas no interior do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 103 - Reator fechado para início do processo de compostagem da terceira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

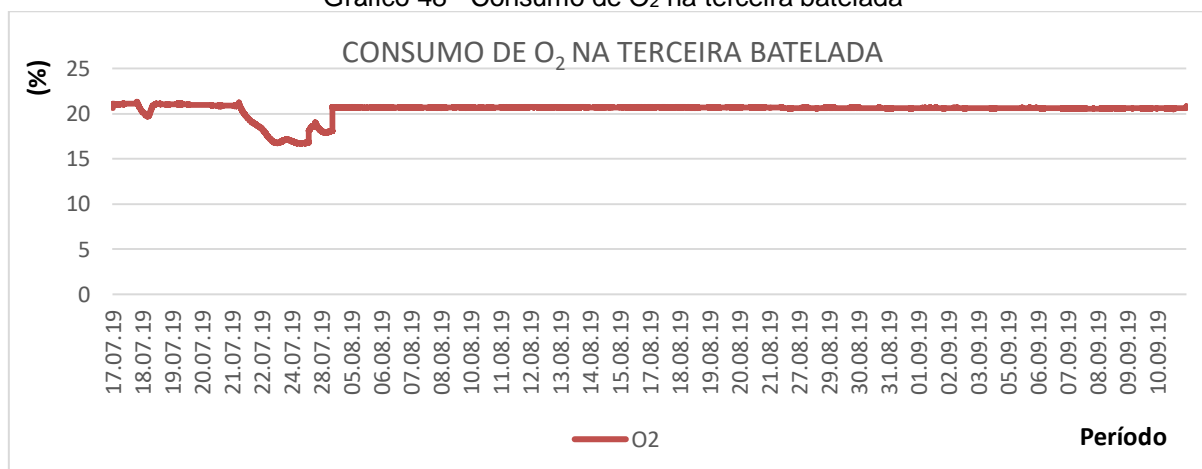
Esta terceira batelada se desenvolveu no período de 17 de julho a 12 de setembro de 2019, num total de 58 dias, sendo geradas 60.688 linhas de dados,

informando consumo de O<sub>2</sub> e a emissão de CO<sub>2</sub>, resultante do processo de decomposição de matéria orgânica.

Verifica-se pelo Gráfico 48 que o processo de compostagem começa a ocorrer por volta de 4 dias após o início do processo, porém o percentual de oxigênio ainda está alto, próximo de 13%, e começa a aumentar este índice, indicativo de que o processo de degradação começou a diminuir.

Está diminuição poderia estar associada a falta de matéria orgânica para decompôr, baixa umidade ou falta de aeração.

Gráfico 48 - Consumo de O<sub>2</sub> na terceira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

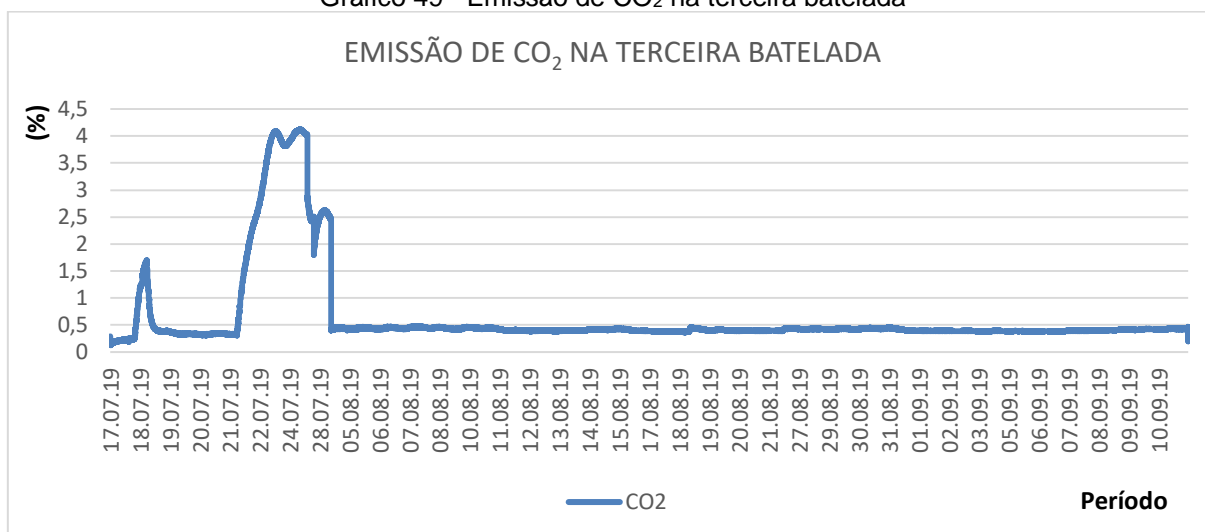
No dia 04 de agosto de 2019, verificou-se novamente a umidade chegando-se ao valor médio de 41,53%, conforme Tabela 32.

Tabela 32 - Determinação da umidade do composto da segunda batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	26,34	28,31	1,97	27,46	1,12	43,15
M60	29,92	48,8	18,88	41,18	11,26	40,36
M95	27,48	47,85	20,37	39,48	12	41,09
Média						41,53%

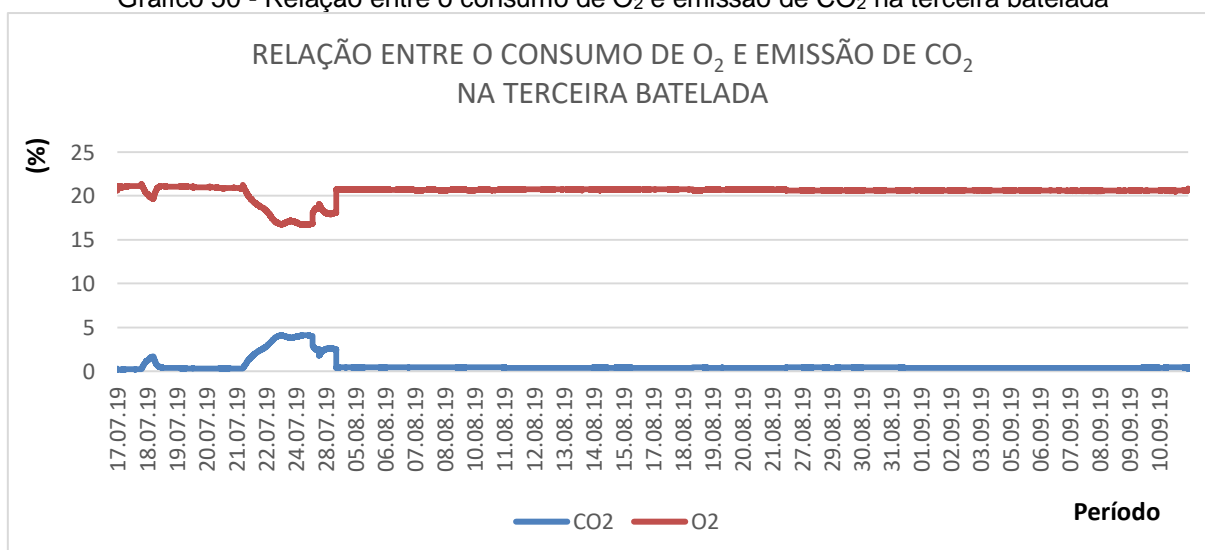
Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta vez, optou-se por não atuar na alteração da umidade do composto, na tentativa de evitar a formação de grumos compactados, como aconteceu nas bateladas 1 e 2, o que se verifica que não estava ocorrendo neste momento, havendo vazios internos nos resíduos que favoreciam a aeração. Porém como observado no Gráfico 49, o processo de decomposição biológica não voltou a ocorrer no processo após o dia 24 de julho de 2019.

Gráfico 49 - Emissão de CO<sub>2</sub> na terceira batelada

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 50 também está apresentado esta relação de consumo de O<sub>2</sub> e emissão de CO<sub>2</sub>, na qual a partir do dia 05 de agosto permaneceu inalterada.

Gráfico 50 - Relação entre o consumo de O<sub>2</sub> e emissão de CO<sub>2</sub> na terceira batelada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também na tentativa de aguardar que outro fator, como a formação de colônia de bactérias pudessem estar mais lentas, esperou até o dia 13 de setembro de 2019, sendo encerrado.

Ao abrir o reator (Figuras 104 e 105), verificou-se que o mesmo apresentava muita poeira, e o composto ao ser analisado, conforme apresentado na Tabela 33, apresentou baixa umidade (13,49%), o que justifica o encerramento do processo.

Figura 104 - Resultado da terceira batelada, apresentando poeira no interior do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 105 - Composto gerado na terceira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 - Determinação da umidade do composto da terceira batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	26,34	35,61	9,27	34,35	8,01	13,59
M60	29,92	39,62	9,7	38,2	8,28	14,64
M95	27,48	41,12	13,64	39,45	11,97	12,24
Média						13,49%

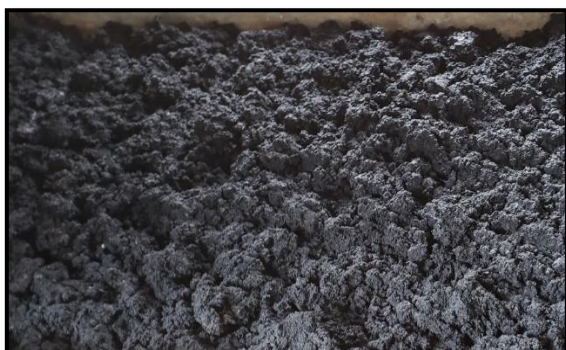
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 RESULTADOS OBTIDOS NA QUARTA BATELADA

A quarta batelada contou com quatro resíduos diferentes no processo de co-compostagem. O lodo de esgoto permaneceu como o resíduo base, e foram acrescentados o resíduo de alimento de restaurante, coletado no restaurante localizado no Campus da Universidade Estadual Paulista - Unesp, em Bauru, com a finalidade do aumento da concentração de carbono no processo.

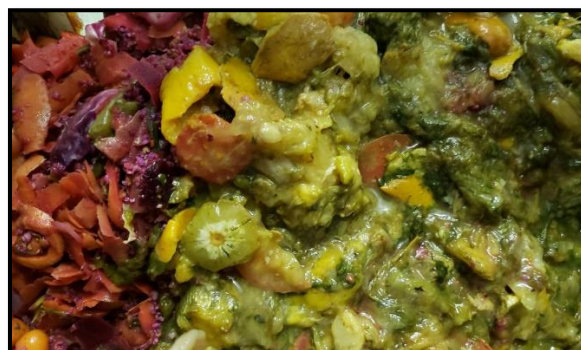
Como a mistura de alimentos, apesar de heterogênea, possui alta umidade, foi acrescentado o bagaço de cana-de-açúcar para equilibrar a umidade do processo. O quarto resíduo foi introduzido na busca de aumentar a aeração, com a introdução de resíduos de poda de gramíneas. Os resíduos utilizados nesta batelada estão apresentados nas Figuras 106 a 109.

Figura 106 - Lodo de esgoto utilizado na quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 107 - Resíduos de alimentos de restaurante utilizados na quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 108 - Resíduos de poda de gramíneas utilizados na quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 109 - Resíduos de bagaço de cana-de-açúcar utilizados na quarta batelada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A umidade dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar foi a mesma utilizada nas bateladas anteriores (9,7%), já que os resíduos permaneceram acondicionados hermeticamente. Com relação aos resíduos de alimento, não foi possível obter seu índice, devido a heterogeneidade dos resíduos utilizados.

Nas Tabelas 34 e 35 apresentam-se as umidades dos resíduos de lodo de esgoto de poda de gramíneas.

Tabela 34 - Determinação da umidade do lodo de esgoto utilizado na quarta batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	23,24	23,24	39,05	15,81	35,04	25,36
M60	29,94	29,94	44,23	14,29	40,39	26,87
Média						<b>26,12%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 - Determinação da umidade do resíduo de poda grama utilizado na quarta batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M22	29,1	35,12	6,02	34,43	5,33	11,46
M95	27,5	33,89	6,39	33,12	5,62	12,05
			Média			<b>11,76%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta quarta batelada, a granulometria não foi verificada nos resíduos de poda de gramínea e nos resíduos de alimentos. Utilizou-se a mesma granulometria do bagaço de cana-de-açúcar utilizado na segunda batelada, pois o resíduo faz parte do mesmo lote de resíduo, já o lodo de esgoto passou por uma análise granulométrica, obtendo-se a distribuição conforme a Tabela 36 e apresentadas na Figura 110.

Tabela 36 - Distribuição granulométrica do lodo de esgoto utilizado na quarta batelada

Peneira (mm)	Massa(kg)
9,5	0,163
6,3	0,622
4,76	0,297
2,4	0,410
1,2	0,202
0,6	0,093
0,297	0,073
0,149	0,034
Fundo	0,026
<b>Total</b>	<b>1,920</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 110 - Granulometria dos resíduos de lodo de esgoto da terceira batelada



Fonte: Elaborado pelo autor

Após análise granulométrica, os dois resíduos foram misturados, perfazendo um total de 3,852kg (Tabela 37).

Tabela 37 - Total de resíduos utilizados na terceira batelada

Resíduo	Massa(kg)
Lodo de esgoto	1,920
Resíduos de poda de gramíneas	0,413
Resíduos de bagaço de cana-de-açúcar	0,842
Resíduos de alimentos	11,989
<b>Total</b>	<b>15,164</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma o total de resíduos destinados para esta quarta batelada teve um total de 15,164kg, sendo depositados no reator conforme as Figuras 111 e 112, iniciando seu processo de compostagem em 26 de outubro de 2019, em uma temperatura ambiente de 26,4°C.

A adição de resíduos de alimentos de restaurante, que em geral se apresenta rico em nitrogênio, não apresentando na literatura valores médios, logicamente devido à heterogeneidade apresentada. Assim, a relação C/N teve tendência a ficar mais baixa, devido a massa de 11,989kg, que representa aproximadamente 80% dos resíduos desta batelada.

Figura 111 - Resíduos de alimentos de restaurante depositados no reator para quarta batelada



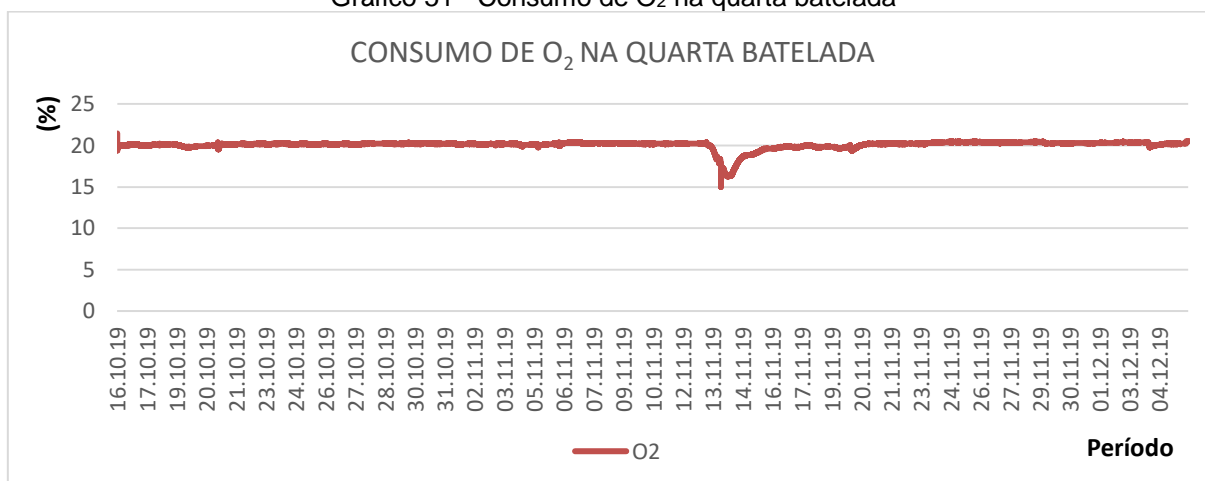
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 112 - Lodo de esgoto depositado junto aos demais resíduos para quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta quarta batelada se desenvolveu no período de 16 de outubro a 06 de dezembro de 2019, num total de 52 dias, sendo geradas 73.097 linhas de dados, também informando o consumo de O<sub>2</sub> e a emissão de CO<sub>2</sub>, resultante do processo de decomposição de matéria orgânica (Gráfico 51).

Gráfico 51 - Consumo de O<sub>2</sub> na quarta batelada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Do início do seu processo até o dia 09 de novembro o consumo de oxigênio foi praticamente nulo. Esta demora em iniciar o processo levou à abertura do reator para verificar quais dos parâmetros estavam interferindo no processo. Ao abrir o reator, verificou-se que o mesmo apresentava muita compactação e alguns grumos, aparentando alta umidade, como pode ser observado pela Figura 113.

Figura 113 - Resultado parcial do composto da quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Coletou-se uma amostra para análise da umidade do resíduo, e os resultados apontaram uma umidade de 74,2%, como apontado por meio da Tabela 38.

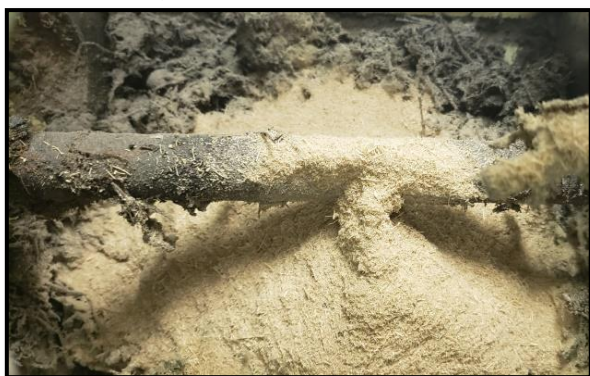
Tabela 38 - Determinação da umidade do composto da quarta batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	23,24	76,01	52,77	37,01	13,77	73,9
M22	29,09	71,12	42,03	39,91	10,82	74,3
M95	27,49	65,3	37,81	37,14	9,65	74,5
Média						74,2%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O composto foi revolvido e a ele foi adicionado 0,483kg de bagaço de cana-de-açúcar, para buscar-se a diminuição da umidade e também 1,433kg de resíduos de poda de gramíneas, na tentativa de aumentar a aeração do processo (Figuras 114 e 115).

Figura 114 - Adição de bagaço de cana-de-açúcar na quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

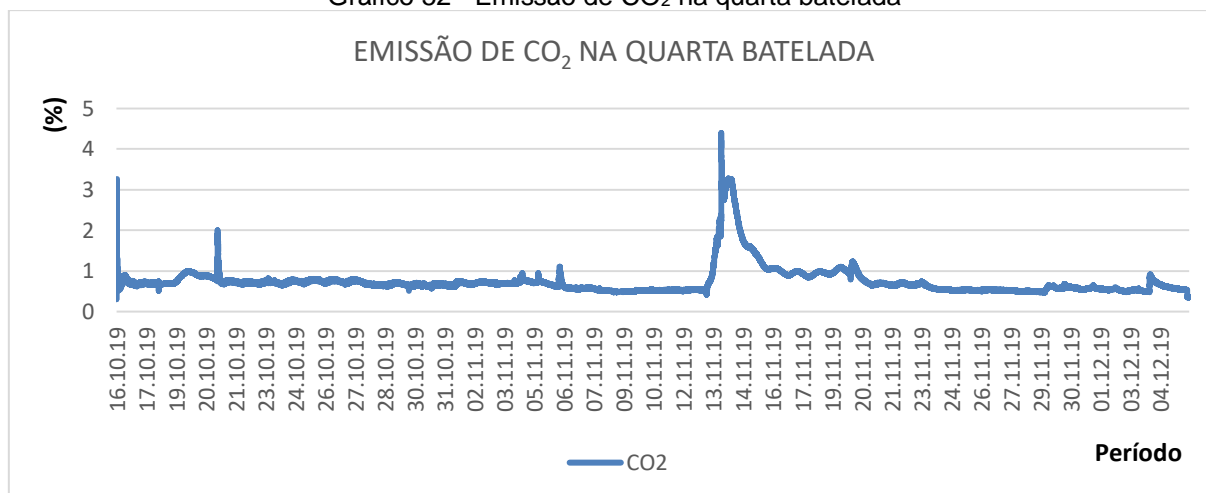
Figura 115 - Adição de resíduos de poda de gramíneas na quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

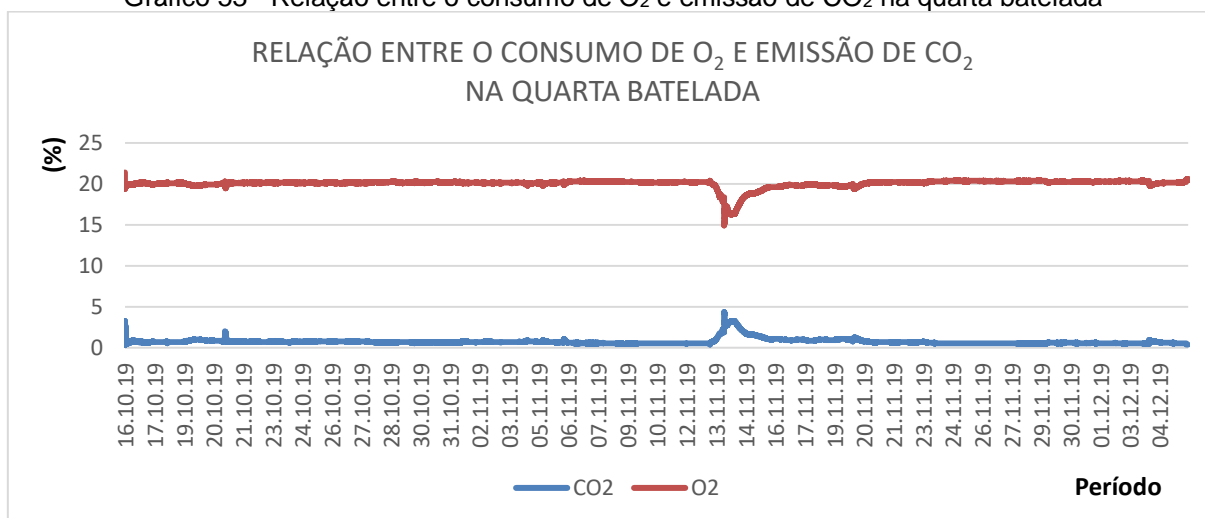
A princípio, como pode ser observado pelo Gráfico 52 de emissões de CO<sub>2</sub>, o resultado teve efeito, ocorrendo o percentual de aproximadamente 4,5% de CO<sub>2</sub> no dia 14 de novembro de 2019, porém este efeito durou apenas dois dias, voltando a decair.

Gráfico 52 - Emissão de CO<sub>2</sub> na quarta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 53 está apresentado por meio da relação consumo de O<sub>2</sub> e emissão de CO<sub>2</sub>, que o processo só ocorreu no dia que foi estimulado pela inserção dos materiais. Isto deve ter ocorrido principalmente pela presença de resíduos de alimentos, que apresentam muita umidade, mas que devido a heterogeneidade é de difícil avaliação pelo processo de aquecimento em estufa.

Gráfico 53 - Relação entre o consumo de O<sub>2</sub> e emissão de CO<sub>2</sub> na quarta batelada

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao abrir o reator, verificou-se que o mesmo voltou a formar grumos e a se compactar, e apresentando colônias de fundos no seu exterior (Figuras 116 e 117). O material foi descompactado mecanicamente e seco em ambiente aberto para análise do composto.

Figura 116 - Resultado da quarta batelada, apresentado colônia de fungos no interior do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 117 - Composto gerado na quarta batelada, após ser descompactado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A presença de fungos é um indicador de que o composto estava com excesso de umidade, o que impossibilitou a aeração e o desenvolvimento de colônias de bactérias decompositoras.

#### 4.5 RESULTADOS OBTIDOS NA QUINTA BATELADA

Na quinta batelada utilizou-se o segundo reator hermético, com capacidade para 974,3 litros, conforme descrito anteriormente. Os resíduos desta batelada tiveram como objetivo dar uma destinação correta aos resíduos gerados no Campus

da Unesp de Bauru. O primeiro deles foram os resíduos de poda e capinação, que parte está disposto em forma de leira a céu aberto. O segundo resíduo utilizado foi o de resto de alimento de restaurante, que também em um restaurante terceirizado presente no campus e ainda no restaurante universitário. O terceiro resíduo foi o de alimentos de restaurante, que foi utilizado no intuito de equilibrar a umidade, presente em maior quantidade nos alimentos.

Os resíduos utilizados nesta batelada são apresentados nas Figuras 118 a 121:

Figura 118 - Resíduos gerados pelo serviço de poda que é executado constantemente no Campus Unesp de Bauru



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 119 - Armazenamento dos resíduos de podas em forma de leiras no Campus Unesp de Bauru



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 120 - Resíduos de alimentos gerados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 121 - Resíduo de bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não foram feitas análises de umidade nem de granulometria, em uma tentativa de reproduzir uma aplicação prática da compostagem em reator hermético fechado. Após pesagem, resíduos foram misturados, perfazendo um total de 3,852kg (Tabela 39), dando início ao processo de compostagem no dia 13 de dezembro de 2019, como pode ser observado nas Figuras 122 a 127.

Tabela 39 - Total de resíduos utilizados na quinta batelada

Resíduo	Massa(kg)
Resíduos de poda	32,04
Resíduos de alimentos de restaurante	36,86
Resíduos de bagaço de cana-de-açúcar	4,70
<b>Total</b>	<b>73,60</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 122 - Reator hermético rotativo com capacidade para 974,27cm<sup>3</sup> de resíduos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 123 - Disposição interna do reator com destaque para saída de ar para análise gasosa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 124 - Disposição de resíduos de podas no interior do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 125 - Disposição de resíduos de alimentos de restaurante no interior do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 126 - Disposição de bagaço de cana-de-açúcar no interior do reator



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 127 - Início do processo de compostagem da quinta batelada



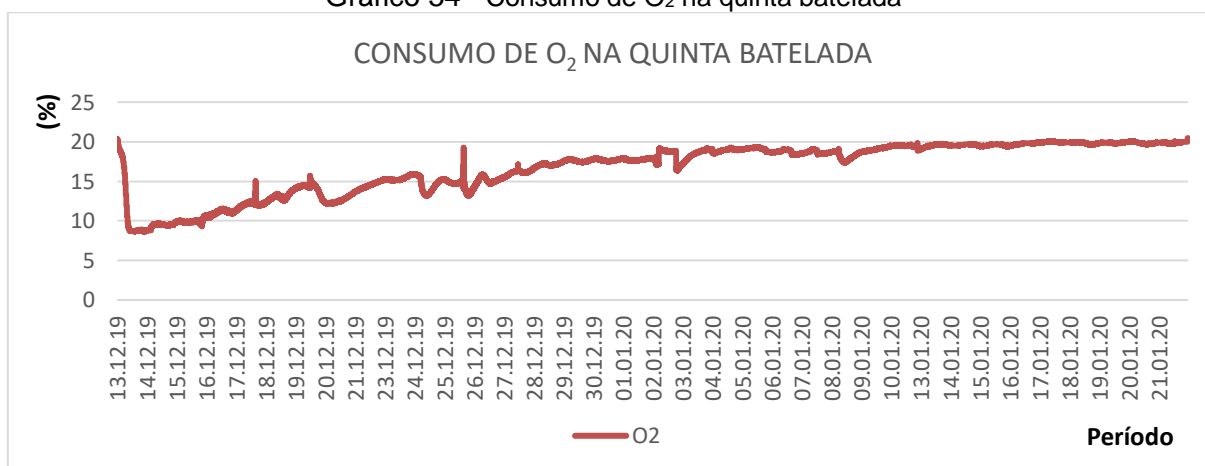
Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação C/N nesta quinta batelada apresentou os resíduos de alimentos com maior quantidade de nitrogênio e os resíduos de poda e bagaço de cana-de-açúcar com maior quantidade de carbono.

A quinta batelada, desenvolvida em um reator maior que os das bateladas anteriores, se desenvolveu no período de 13 de dezembro de 2019 a 22 de janeiro de 2020, totalizando 40 dias de processo. Foram geradas pela leitura *on line* do consumo de O<sub>2</sub> e a emissão de CO<sub>2</sub> em 57.382 linhas de dados, resultantes do processo de decomposição de matéria orgânica.

Vale lembrar que, neste processo, não foi adicionado o lodo de esgoto, e os demais resíduos apresentaram características de alta velocidade de decomposição, como verifica-se no Gráfico 54 em que o processo de compostagem começa a ocorrer quase que imediatamente após o fechamento do reator.

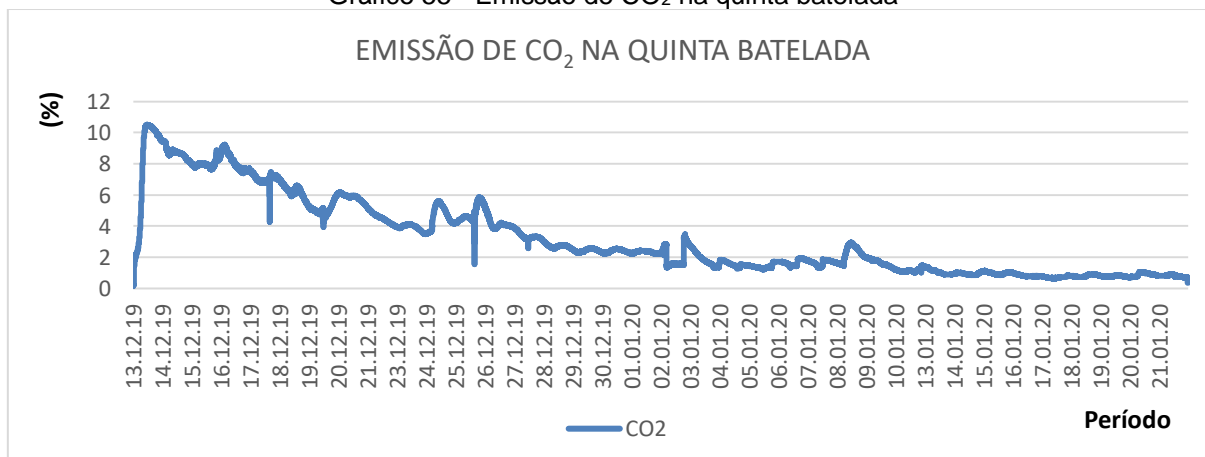
Gráfico 54 - Consumo de O<sub>2</sub> na quinta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 55 é apresentado a emissão de CO<sub>2</sub> alcançou valores próximos a 10% dos gases no composto logo nos primeiros dias.

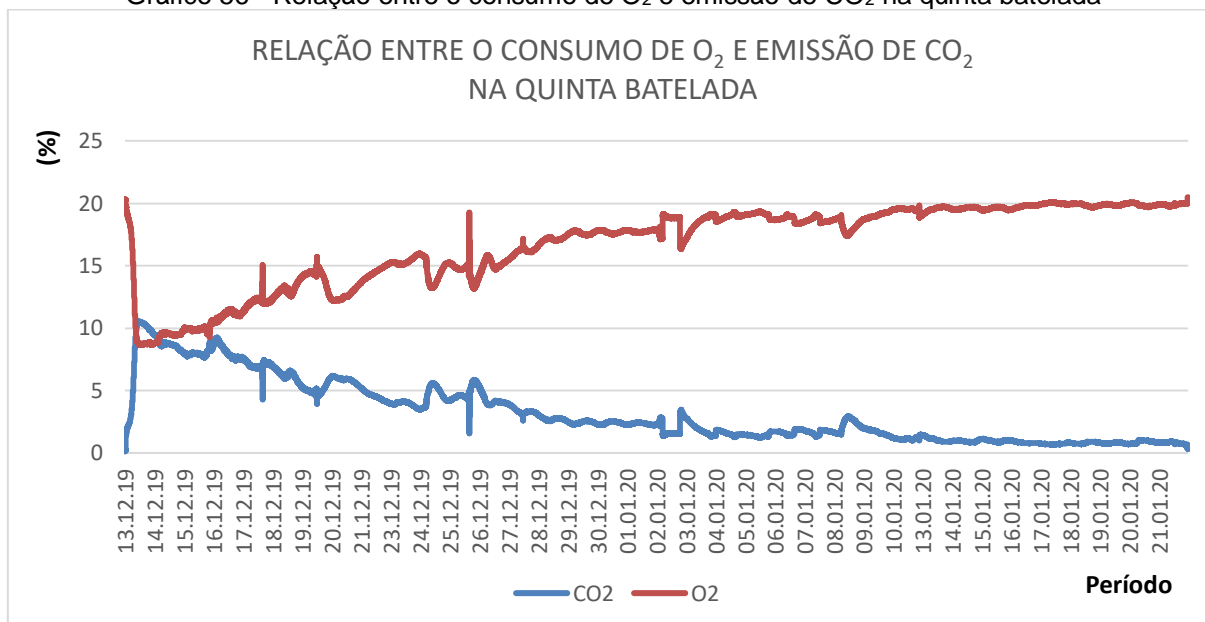
Gráfico 55 - Emissão de CO<sub>2</sub> na quinta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na relação entre o consumo de  $O_2$  e emissão de  $CO_2$  apresentada no Gráfico 56, é possível verificar que no início as curvas chegam a se inverterem, mas ao longo do processo elas vão diminuindo e por volta dia 13 de janeiro 2020, estabiliza, apontando que o processo de decomposição não estava mais ocorrendo.

Gráfico 56 - Relação entre o consumo de  $O_2$  e emissão de  $CO_2$  na quinta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da Figura 128, nota-se que após dez dias de início do processo, no dia 23 de dezembro, o volume já havia reduzido para quase metade.

Figura 128 - Processo de compostagem da quinta batelada após dez dias de início



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante o processo foi necessário resolver alguns problemas que ocorreram com os equipamentos: troca de correias que estavam ressecadas devido ao tempo

que ficaram ociosas, reprogramação para evitar sobrecarga no inversor, alinhamento de polias para evitar desgaste das correias (Figura 129).

Figura 129 - Substituição e alinhamento das correias do motor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à estabilização do processo, o reator foi desligado e aberto para análise do composto no dia 22 de janeiro de 2020. Ressalta-se que este reator apresenta uma dificuldade de interação no processo, por apresentar somente uma abertura total de uma lateral, não apresentando um ponto de acesso de coleta de amostra, como no primeiro reator.

A Figura 130 apresenta a lateral do reator após ser aberto, onde podemos observar a compactação que ocorreu em grande parte da mesma.

Figura 130 - Tampa retirada para abertura do reator ao final da quinta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na Figura 131 apresenta-se o resultado do processo no interior do reator, onde verifica-se que o composto ficou compactado principalmente nas laterais do mesmo e no seu eixo central.

Figura 131 - Resíduos depositados no eixo e nas paredes do reator ao final da quinta batelada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para comprovação do excesso de umidade foi feito o ensaio em estufa, obtendo-se o resultado de 65,7% de umidade, conforme dados apontados na Tabela 40. Esta umidade deve-se provavelmente a grande quantidade alimentos depositadas no reator, que aliados ao movimento rotativo, cria uma espécie de centrifugação dos resíduos, o que leva ao processo de compactação

Tabela 40 - Determinação da umidade do composto da quinta batelada

Cápsula	Tara (mg)	Massa Inicial (mg)	Úmido (mg)	Massa Final (mg)	Seco (mg)	Umidade (%)
M17	23,24	84,01	60,77	42,58	19,34	68,2
M22	29,09	80,74	51,65	46,46	17,37	66,4
M95	27,49	71,66	44,17	44	16,51	62,6
Média						65,7%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final do processo, o resíduo foi descompactado mecanicamente e submetido a processo de secagem ao ar livre, para ser enviado para análise de matéria orgânica e macronutrientes (Figura 132).

Figura 132 - Composto gerado ao final da quinta batelada e descompactado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após as bateladas, as amostradas foram encaminhadas para análise laboratorial de macronutrientes, pH e de matéria orgânica, conforme apresentadas a seguir.

#### 4.6 ANÁLISES LABORATORIAS DOS COMPOSTOS GERADOS NAS BATELADAS

As amostras dos resultados das bateladas, foram encaminhadas a um laboratório privado para análise de macronutrientes, pH e matéria orgânica. Também foram encaminhadas três amostras do processo de compostagem realizados na estação de tratamento de tratamento de esgotos, sendo a primeira no início do processo, a segunda em um estágio intermediário e por fim a última, no encerramento do processo de compostagem, para servir de base aos resultados obtidos no experimento.

Assim, foram sete o total de amostras analisadas, sendo que vale ressaltar que devido as condições de compactação do resultado da primeira batelada, não foi possível enviar amostras para análise.

Desta forma as amostras enviadas foram conforme apresentadas no Quadro 12:

Quadro 12 - Amostras dos compostos enviadas para análise laboratorial

Amostra	Material
1	Estufa de compostagem da ETE – Início do processo
2	Estufa de compostagem da ETE – Processo intermediário
3	Estufa de compostagem da ETE – Final do processo
4	Composto final da batelada 2
5	Composto final da batelada 3
6	Composto final da batelada 4
7	Composto final da batelada 5

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 41 apresenta os valores encontrados pela análise laboratorial das amostras para pH, matéria orgânica e para fósforo.

Tabela 41 – Análise laboratorial de pH, MO e P

Amostra	pH	pH	MO	P resina
	(CaCl <sub>2</sub> )	(SMP)	g/dm <sup>3</sup>	Mg/dm <sup>-3</sup>
1	5,20	6,14	223,00	77,30
2	5,00	5,81	124,00	2.229,70
3	5,80	6,35	139,00	1.173,20
4	5,70	6,64	235,00	1.802,50
5	6,20	7,42	116,00	338,90
6	5,40	6,72	201,00	771,30
7	5,90	6,80	198,00	18,40

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de análise laboratorial.

O pH mede a atividade de H<sup>+</sup> que está presente na solução do solo, chamada de acidez ativa, sendo que há dois processos para determinar o pH numa análise de solo: o pH em água e o pH em CaCl<sub>2</sub>, sendo este último usado em alguns Estados brasileiros para diminuir a influência dos sais sobre a leitura. O pH serve para apontar a fertilidade de um solo, ou seja, acima de pH 5,6 em água é um indício de não existir mais Al<sup>3+</sup> tóxico no solo. A melhor faixa de valores de pH para as culturas está entre 6,0 e 6,5 na qual os nutrientes apresentam melhor disponibilidade para as plantas, sendo que acima de pH 6,5 já aparecem problemas na disponibilidade de nutrientes para as culturas.

Desta forma observamos as amostras que aparecem dentro dos parâmetros ideais de pH, obtidos pelo (SMP), são as amostras 1 e 3, porém as demais aparecem com valores acima de 5,6, apontando sua fertilidade ao solo.

A matéria orgânica (MO) pode ser qualquer resíduo vegetal ou animal que contém carbono e outros nutrientes, que são mineralizados por ação microbiana, esses compostos contêm nutrientes de plantas, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), enxofre (S), ferro (Fe), cobre (Cu), que durante sua decomposição, ocorre a transformação dos nutrientes que estão na forma orgânica, para a forma mineral, que é a forma predominantemente absorvida pelas plantas. As amostras que apresentaram maiores índices de MO foram a amostra inicial da compostagem e a amostra da batelada 2.

Os macronutrientes K, Ca, Mg, Al e H analisados nas amostras, são apresentados na Tabela 42:

Tabela 42 – Análise laboratorial de macronutrientes

Amostra	K	Ca	Mg	Al	H
	Mmol/dm <sup>3</sup>				
1	10,86	327,00	82,00	11,00	25,38
2	10,70	402,30	85,70	6,00	45,46
3	1,45	172,60	22,50	7,00	22,18
4	6,54	193,40	53,50	6,00	15,52
5	12,00	80,90	43,10	2,00	7,48
6	11,56	116,90	62,70	1,00	18,78
7	11,86	180,70	52,00	3,00	15,19

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de análise laboratorial.

Com relação aos macronutrientes, temos que os valores de K apresentaram uma regularidade próximo de 11 Mmol/dm<sup>3</sup> tendo como destoante apenas a amostra do composto final em estufa da ETE, que apresentou 1,45 Mmol/dm<sup>3</sup> e a primeira batelada, com 6,54 Mmol/dm<sup>3</sup>. Com relação ao Ca, as bateladas 3 e 4 apresentaram os menores valores. Já com relação ao Mg a batelada 1 foi aquela que apresentou menores valores e os maiores as duas primeiras amostras da compostagem em estufa. A batelada 4 foi a que apresentou o menor valor para Al (1,00 Mmol/dm<sup>3</sup>) e o maior valor no início da compostagem em estufa (11,00 Mmol/dm<sup>3</sup>). Já para os valores de H a batelada 5, com 7,48 Mmol/dm<sup>3</sup> apresentou o menor valor.

Pode observar pela Tabela 43 o resultado das somas de base (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), percentual de saturação de base (V) e de alumínio (m).

Tabela 43 – Análise laboratorial de SB, CTC, V e m

Amostra	SB	CTC	V	m
		Mmolc/dm <sup>-3</sup>		%
1	419,86	456,24	92,00	2,60
2	498,70	550,16	90,60	1,10
3	196,55	225,73	87,10	3,20
4	253,44	274,96	92,20	2,20
5	136,00	145,48	93,50	1,40
6	191,16	210,94	90,60	0,50
7	244,56	262,75	93,10	1,10

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de análise laboratorial.

A soma de base (SB), apresentou os maiores índices nas duas primeiras amostras da compostagem em estufa na ETE, a capacidade de troca catiônica (CTC) apresentou o menor valor na batelada 3 (145,48 Mmolc/dm<sup>-3</sup>) e a maior a compostagem da segunda amostra (550,16 Mmolc/dm<sup>-3</sup>), a saturação por base (V) apresentou todos os valores muito próximos e na saturação por alumínio (m) o menor valor foi a da quarta batelada.

Verifica-se pela discrepância de valores, que a heterogeneidade dos resíduos leva a resultados também heterogêneos, tornando a análise pré e pós compostagem, indispensável para garantir a qualidade dos compostos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do lodo de esgoto pelo método respirométrico, demonstrou ser uma ferramenta, que por fornecer acompanhamento operacional e a avaliação do andamento progressivo do processo de degradação dos resíduos orgânicos, pode a vir a ser muito útil, desde que sejam levados em considerações os parâmetros apontados na literatura, como Gea *et al.* (2004) que estudaram o monitoramento da atividade biológica do processo de compostagem.

Todos os parâmetros têm a mesma importância, e o processo terá êxito se forem respeitados igualmente, assim, o desafio é fazer o equilíbrio destes parâmetros no momento da escolha dos resíduos e suas quantidades, de encontro com estudos de Bernal *et al.* (1998), que aponta análise de parâmetros de maturidade e estabilidade de compostos preparados como sendo fundamentais para o sucesso da compostagem.

A compostagem somente com lodo de esgoto não atende os parâmetros necessários para um processo eficiente de compostagem, visto que, apresenta uma baixa relação C/N, em torno de 8/1, a sua granulometria seca não é ponto de referência, pois ao ser umedecido dentro dos parâmetros para que ocorra o processo, o mesmo se torna novamente pastoso, e devido ao movimento rotativo do reator, forma grumos e compacta-se, não havendo a aeração, e processo não se desenvolve, e ainda, segundo Amir *et al.* (2005) a necessidade de análise do teor total de metais pesados e sua biodisponibilidade no sistema solo-planta, sendo sua principal limitação da aplicação do composto de lodo de esgoto no solo.

O resíduo do bagaço de cana-de-açúcar, devido à sua baixa umidade, colabora no equilíbrio deste parâmetro. Porém, para buscar um equilíbrio de C/N o volume a ser utilizado seria muito grande, por apresentar baixa densidade de massa. Também sua granulometria precisa ser maior do que a utilizada no experimento, pois ao receber a umidade necessária, este acabou se agregando ao lodo de esgoto e compactando-se.

Os resíduos de resto de alimentos de restaurante agregados ao lodo de esgoto possuem também alguns desafios a serem superados, principalmente advindo de sua heterogeneidade, que interferem no teor de umidade, quase sempre muito alto, na relação C/N, que em geral é baixa para agregar sem outro resíduo ao

lodo de esgoto. Também sua granulometria é inconstante, podendo ocorrer materiais de difícil decomposição, como ossos e gorduras. A sua vantagem é a rapidez no processo de degradação biológica.

O material utilizado que apresentou melhores condições de co-compostagem com o lodo de esgoto, foram os restos de podas de gramíneas secos, devido a sua granulometria, que favorece a aeração, a relação C/N mais alta, que pode ser balanceada com a relação C/N do lodo de esgoto e sua baixa umidade. O desafio nesta co-compostagem é a relação ideal entre proporção de resíduos, respeitando-se volume e massa dos materiais.

Na quinta batelada, na qual não foi utilizado o lodo de esgoto, ficou demonstrado a velocidade de decomposição de resíduos gerados em abundância, em especial, dentro do Campus da Unesp de Bauru, surgindo como alternativa para um processo controlado, sem emissão de odor e livre da presença de vetores.

O trabalho aponta que se deve em estudos posteriores analisar a velocidade ideal de rotação dos reatores, bem como seus tempos ideais de rotação e parada, independente dos resíduos utilizados, para evitar o efeito centrífugo exercido sobre os resíduos, que podem ter sido preponderantes na sua compactação.

Um parâmetro que não foi avaliado neste trabalho e que também tem indicação de trabalhos futuros é a temperatura, já que os experimentos se desenvolveram todos em temperatura ambiente, sugerindo-se uma variação da mesma para aferir seu grau de importância no processo.

Observou-se que a umidade é parâmetro fundamental para eficácia e rapidez do processo, e que se faz necessário a implementação de um controle operacional, igualmente automatizado e de forma constante deste parâmetro, o que o barateamento de equipamentos digitais de sensoriamento remoto, poderia ser viável técnica e economicamente ao processo.

O método respirométrico, por permitir avaliações de parâmetros na fase gasosa, através da evolução temporal do consumo de  $O_2$  e respectiva geração de  $CO_2$ , demonstrou ser muito superior em termos de representatividade, precisão e confiabilidade quando comparado ao método tradicional que efetua a avaliação do processo de degradação segundo análise da fase sólida, como afirmam Paletski e Young (1995) e também Lasaridi e Stentiford (1998), a respirometria aeróbia de amostras sólidas de composto proporcionam uma medida precisa da atividade microbiana.

Por apresentar respostas em tempo real “*on line*” em intervalos de tempo reduzidos, o método respirométrico permite uma operação muito mais ajustada e eficiente, incluindo ainda a possibilidade de intervenções em tempo hábil para corrigir determinados erros ou falhas que eventualmente venham a ocorrer no decorrer do processo. Neste sentido, sugere-se que o segundo reator rotativo utilizado seja adaptado para que possibilite a coleta de amostras e a deposição de novos materiais, sem que seja aberto por completo.

O reator rotativo hermético apresentou como vantagens a homogeneização dos resíduos, favorecendo o contato de toda a matéria orgânica com as bactérias decompositoras, acelerando o processo e também o isolamento do odor e do contato com vetores. Apresenta-se como possibilidade de trabalhos futuros a análise das variáveis velocidade de rotação e tempo de rotação e repouso do reator e suas alterações contribuições na eficiência do processo.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de informação e da indústria 4.0, o desenvolvimento de software que garanta a exibição dos dados no formato Gráfico, de forma “*on line*” na tela do computador ou do smartphone, permitiria a avaliação e interação de maneira mais rápida e eficaz no processo.

O gerenciamento de lodo continua sendo uma questão aberta e desafiadora, e o processo de co-compostagem, utilizando os resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto, é viável e importante ferramenta na destinação e tratamento deste resíduo. Mas seu processo deve ser realizado de forma segura, utilizando-se da análise laboratorial, tanto para caracterização dos resíduos a serem co-compostados, quanto do composto obtido, permitindo produção de composto de qualidade, através dos diversos parâmetros de controle e dimensionamento do sistema. Ressalta-se a necessidade de utilizar equipamentos de proteção individual, que garantam a integridade do manuseador do lodo de estação de tratamento de esgotos, visto o alto grau de contaminação que pode oferecer, como descrevem as pesquisas de Kelessidis e Stasinakis (2012).

Neste trabalho também observou-se que não existe uma receita única de compostagem, devendo ser pesquisado, a partir do resíduo orgânico que deseja tratar, as variações de parâmetros e proporções de resíduos necessárias, e ainda, que o processo de compostagem necessita de avanços, como a criação de centros pesquisas, no Brasil e no exterior, que possibilitem o tratamento de praticamente

metade de todos resíduos sólidos urbanos gerados, e que ainda hoje são realizados de forma empírica e rudimentar, conforme aponta Ponsá *et al.* (2009).

## REFERÊNCIAS

- ADANI, F.; CONFALONIERE, R.; TAMBONE, F. **Dynamic Respiration Index as a Descriptor of the Biological Stability of Organic Wastes**. Journal of Environmental Quality, vol.33: pp.1866-1876, 2004.
- AGGELIDES, S.M.; LONDRA, P.A. **Effects of compost produced from town Wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil**. Bioresource Technology, v. 71, n. 3, p. 253-259, 2000.
- AGRAWAL, R.P. SINGHAND M.; **Potential benefits and risks of land application of sewage sludge**. Department of Botany, Banaras Hindu University, Varanasi, India. 2007..
- AIMANIANDA, V.; BAYRY, J.; BOZZA, S.; (...), ROMANI, L.; LATGÉ, J.-P. **Surface hydrophobin prevents immune recognition of airborne fungal spores**. Nature, v. 460, n. 7259, p. 1117-1121, 2009.
- AKUTSU, J.; MARTINS J.E.M.P.; CASTILHO G.S.; RENÓFIO A.; ISA M.M. **Avaliação e Controle Operacional de Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos através de Método Respirométrico**. In: XVI SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção, 2009, Bauru. Anais... Bauru: SIMPEP, 2009.
- ALBIACH, R.; CANET, R.; POMARES, F.; INGELMO, F. **Microbial biomass content and enzymatic activities after the application of organic amendments to a horticultural soil**. Bioresource Technology, v. 75, n. 1, p. 43-48, 2000.
- ALBUQUERQUE, H.C.; MARQUES, C.C.; ARAÚJO, P.G.C.; GONÇALVES, W.P.; MAIA, R.; BARBOSA, E.A. **Caracterização de resíduos sólidos orgânicos produzidos no restaurante universitário de uma instituição pública**. XXVII ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007, Foz do Iguaçu. Anais... ABEPRO-Associação Brasileira de Engenharia de Produção, ENEGEP, 2007.
- ALBUQUERQUE, J. B. T. **Resíduos sólidos: Teoria, jurisprudência, legislação, prática**. Leme: Independente, 2011.
- AMASS, W.; AMASS, A.; TIGHE, B. **A review of biodegradable polymers: Uses, current developments in the synthesis and characterization of biodegradable polyesters, blends of biodegradable polymers and recent advances in biodegradation studies**. Polymer International, v. 47, n. 2, p. 89-144, 1998.
- AMIR, S.; HAFIDI, M.; MERLINA, G.; REVEL, J.C. **Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge**. Chemosphere, v. 59, n. 6, p. 801-810, 2005.
- ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S.; FERNANDES, E F. **Disposição do lodo no solo**. In: C.V. Andreoli, M. Von Sperling e F. Fernandes. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 6. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. DESA-UFPRG, Sanepar, 2001.
- ANDREOTTOLA, G.; OLIVEIRA, E.L.; FOLADOR, P.; DALLAGOIV, L.; PETERLINIV, R.; CADONNAGIANNI, M. **Método respirométrico para o monitoramento de processos biológicos**. Engenharia Sanitária Ambiental. 2005, vol.10, n.1, pp. 14-23. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-415abstract&tlng=pt>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

ANGELIDAKI, I.; ALVES, M.; BOLZONELLA, D.; (...), JENICEK, P.; VAN LIER, J.B. **Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic Wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays**

Water Science and Technology, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. Pedra Sul Mineração. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Disponível em: <[http://www.abnt.org.br/m5.asp?cod\\_noticia=30&cod\\_pagina=965](http://www.abnt.org.br/m5.asp?cod_noticia=30&cod_pagina=965)>. Acesso em 10/02/2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). **29º Encontro AESabesp – Fenasan 2018**. Disponível em: <<http://abes-dn.org.br/?p=20597#>>. Acesso em 27/04/2019

BAFFI, C.; DELL'ABATE, M.T.; NASSISI, A.; GENEVINI, P.L.; ADANI, F. **Determination of biological stability in compost: A comparison of methodologies**. Soil Biology and Biochemistry, v. 39, n. 6, p. 1284-1293, 2007.

BAPTISTA, F.R.M. **Caracterização física e comercial do lixo urbano de Vitória - ES, em função da classe social da população geradora**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, 2001.

BARREIRA, L. P. **Avaliação das usinas de compostagem do estado de São Paulo em função da qualidade dos compostos e processos de produção**. 2005. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BEESELEY, L.; MORENO-JIMÉNEZ, E.; GOMEZ-EYLES, J.L. **Effects of biochar and greenWaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil**. Environmental Pollution, v. 158, n. 6, p. 2282-2287, 2010.

BENITEZ, E.; NOGALES, R.; ELVIRA, C.; MASCIANDARO, G.; CECCANTI, B. **Enzyme activities as indicators of the stabilization of sewage sludges composting with Eisenia foetida**. Bioresource Technology, v. 67, n. 3, p. 297-303, 1999.

BERNAL, M.P.; ALBURQUERQUE, J.A.; MORAL, R. **Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review**. Bioresource Technology, v. 100, n. 22, p. 5444-5453, 2009.

BERNAL, M.P.; PAREDES, C.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A.; CEGARRA, J. **Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes**. Bioresource Technology, v. 63, n. 1, p. 91-99, 1998.

BERNAL, M.P.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A.; PAREDES, C.; ROIG, A. **Carbon mineralization from organic Wastes at different composting stages during their incubation with soil**. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 69, n. 3, p. 175-189, 1998.

BETTIOL, W. & CAMARGO, O. **A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola**. In: LODO de esgoto: Impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente, 2006. 347p

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. New York, Ed. Wiley, p. 381. 2001.

BONTURI, G.; DIJK, M. **Instalação de Biodigestores em Pequenas Propriedades Rurais: Análise de Vantagens Socioambientais**. UNICAMP, SP, 2012.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Versão preliminar. Dispon. em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/253/\\_arquivos/versao\\_preliminar\\_pnrs\\_wm\\_253.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_arquivos/versao_preliminar_pnrs_wm_253.pdf). Acesso em: 05 março 2018.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei n 12305 de 02 de agosto de 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 05 fevereiro 2018.

BRITO, M. J. C. **Processo de compostagem de resíduos urbanos em pequena escala e potencial de utilização do composto como substrato**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, Aracaju, SE, 2008.

BROLLO, M. J.; SILVA, M. M. **Política e gestão ambiental em resíduos sólidos: revisão e análise sobre a atual situação no Brasil**. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. Anais...São Paulo: USP, 2001.

BROOKES, P.C.; MCGRATH, S.P. **Effect of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass**. Journal of Soil Science, v. 35, n. 2, p. 341-346, 1984.

BRUSEKE, F. J. A. **Economia da sustentabilidade: Princípios; O Problema do Desenvolvimento sustentável**. In: CAVALVANTI, C. (Org.). Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma sociedade sustentável. Pernambuco: Instituto de Pesquisas Sociais; Fundação Joaquim Nabuco; Ministério de Educação; Governo Federal, 1994.

CAMARGO, L.B. **As dimensões e os desafios do desenvolvimento sustentável: concepções, entraves e implicações à sociedade humana**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CAMPOS, A. L. de O.; BLUNDI, C. E. **Avaliação de matéria orgânica em compostagem: metodologia e correlações**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1999

CANAKCI, M. **The potential of restaurant Waste lipids as biodiesel feedstocks**. Bioresource Technology, v. 98, n. 1, p. 183-190, 2007.

CARDOSO, R. da S. *et al.* **Ciclo de Vida do Produto, Tecnologia e Sustentabilidade: Breve Análise da Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos no Brasil**. Foz do Iguaçu - PR: ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 09 a 11 de outubro de 2007. Anais... XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção 2007.

CATUNDA, Sebastian; DEEP, Gurdip; HAANDEL, Adrianus; FREIRE, Raimundo. **Métodos alternativos para medição da taxa de consumo de oxigênio em sistemas de Lodo Ativado. Controle e Automação**, São Paulo: v.9, n.2, 57-64, mai./ago. 1998.

CHIBA, M.K. *et al.* **Cultivo de cana-de-açúcar em Argissolo tratado com lodo de esgoto**. Revista Brasileira de Ciências do Solo, vol.32, nº.2, Viçosa, 2008.

CHIELLINI, E.; CORTI, A.; SWIFT, G. **Biodegradation of thermally-oxidized, fragmented low-density polyethylenes**. Polymer Degradation and Stability, v. 81, n. 2, p. 341-351, 2003.

COMASTRI FILHO, J. **BIOGÁS: Independência Energética do Pantanal Matogrossense**. Embrapa. 1981.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação**. São Paulo: Cetesb, 1999. 32p. (Norma P 4230).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=1993>>. Acesso em 30/07/2017.

CORREA, Rodrigo S.; FONSECA, Yone M. F. and CORREA, Anelisa S. **Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, vol.11, n.4, pp. 420-426. 2007.

COSTA, E. R. **Uma visão comentada sobre a lei da PNRS**. In: Revista Petrus. 2015. Disponível em: <<http://www.revistapetrus.com.br/uma-visao-comentada-sobre-a-lei-da-pnrs/>>. Acesso em abril 2017.

DAVIES, P. S. **The biological basis of wastewater treatment**. Glasgow, UK. Strathkelvin Instrument Ltd, 2005.

DEMIRBAŞ, A. **Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals**. Energy Conversion and Management, v. 42, n. 11, p. 1357-1378, 2001.

DEMIRBAS, A. **Combustion characteristics of different biomass fuels**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.

ELVIRA, C.; SAMPEDRO, L.; BENÍTEZ, E.; NOGALES, R. **Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with Eisena andrei: A pilot-scale study**. Bioresource Technology, v. 63, n. 3, p. 205-211, 1998.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos**. Fortaleza: EMBRAPA, 2004.

EPSTEIN, E. **The science of composting**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997

EPSTEIN, E.; TAYLOR, J.M.; CHANEY, R.L. **Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties**. Journal of Environmental Quality, v. 5, n. 4, p. 422-426, 1976.

FADINI, P. S.; FADINI, A.A.B. **Lixo: desafios e compromissos**. In Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. Edição especial, maio 2001.

FARIA, C. R. S. M. **A Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Boletim do Legislativo, Brasília, DF. n.12, 2012. Disponível em: <[www.senado.gov.br/senado/conleg/boletim\\_do\\_legislativo.html](http://www.senado.gov.br/senado/conleg/boletim_do_legislativo.html)>. Acesso em: abr de 2017.

FARIAS, T. Q. **Evolução histórica da legislação ambiental**. In: Âmbito Jurídico, Rio Grande, X, n. 39, mar 2008. Disponível em: <[http://www.ambitojuridico.com.br/site/index.php?n\\_link=revista\\_artigos\\_leitura&artigo\\_id=3845](http://www.ambitojuridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=3845)>. Acesso em abril 2017.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. da. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), 1999. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/Livro%20Compostagem.pdf>>.

FERNANDES, F.; SOUZA, S.V.. **Estabilização de lodo de esgoto**. In: ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

FERNANDES, F; SOUZA, S.G. de; NUNES, C.W.; NOGUEIRA, R.G.; IZUME, F. **Automação para o controle da aeração em reator piloto para compostagem do lodo**. Semina: Ci. Exatas/Tecnol. Londrina, v. 21, n. 4, p. 89-94, dez. 2000.<<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/3017/2560>>. Acesso em: 08/02/2018.

FRANCOU, C.; LINÈRES, M.; DERENNE, S.; VILLIO-POITRENAUD, M.L.; HOUOT, S. **Influence of green Waste, bioWaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting**. Bioresource Technology, v. 99, n. 18, p. 8926-8934, 2008.

GAJALAKSHMI, S.; ABBASI, S. A. **Solid waste management by composting: state of art**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 38, n. 5, p.311-400, 2008.

GARG, P.; GUPTA, A.; SATYA, S. **Vermicomposting of different types of Waste using Eisenia foetida: A comparative study**. Bioresource Technology, v. 97, n. 3, p. 391-395, 2006.

GEA T. ; ARTOLA A. ; SÁNCHEZ A. ; **Composting of de-inking sludge from the recycled paper manufacturing industry**. Bioresource Technology 96 (2005) 1161-1167, 2004.

GEA, T.; BARRENA, R.; ARTOLA, A.; SÁNCHEZ, A. **Monitoring the biological activity of the composting process: Oxygen uptake rate (OUR), respirometric index (RI), and respiratory quotient (RQ)**. Biotechnology and Bioengineering, v. 88, n. 4, p. 520-527, 2004.

GETAHUN, T.; NIGUSIE, A.; ENTELE, T.; VAN GERVEN, T.; VAN DER BRUGGEN, B.; 2012. **Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality**, Resources, Conservation and Recycling, Volume 65, 79-84.

GIL, M.V.; CARBALLO, M.T.; CALVO, L.F. **Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients**, Waste Management, v. 28, n. 8, p. 1432-1440, 2008.

GÓMEZ, R.B.; LIMA, F.V.; BOLASELL, M.A.G.; GEA, T.; FERRER, A.S. **Respirometric assays at fixed and process temperatures to monitor composting process**. Bioresource Technology, v. 96, n. 10, p. 1153-1159, 2005.

GONÇALVES, R. **Proposta de um instrumento de avaliação para subsidiar processos de licenciamento ambiental de centrais de triagem e compostagem de resíduos sólidos domiciliares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

GUPTA, V.K.; JAIN, C.K.; ALI, I.; SHARMA, M.; SAINI, V.K. **Removal of cadmium and nickel from Wastewater using bagasse fly ash - A sugar industry waste**. Water Research, v. 37, n. 16, p. 4038-4044, 2003.

HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering**. Boca Ratón, FL: Lewis Publ.; 1993.

HEBERER, T. **Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water**. *Journal of Hydrology*, v. 266, Edições 3-4, p. 175-189, 2002.

HERBETS, R. A.; *et al.* Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos. **Health and Environment Journal**, v. 6, n. 1, p. 41-50, maio 2005.

HUANG, G.F.; WONG, J.W.C.; WU, Q.T.; NAGAR, B.B. **Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust**. *Waste Management*, v. 24, n. 8, p. 805-813, 2004.

HUBER, M.M.; GÖBEL, A.; JOSS, A.; (...), TERNES, T.A.; VON GUNTEN, U. **Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal Wastewater effluents: A pilot study**. *Environmental Science and Technology*, v. 39, n.11, p. 4290-4299, 2005.

IANNOTTI, D.A.; PANG, T.; TOTH, B.L.; ELWELL, D.L.; HOITINK, H.A.J. **A quantitative respirometric method for monitoring compost stability** *Compost Science and Utilization*, v. 1, n. 3, p. 52-65, 1993.

IGLESIAS JIMÉNEZ, E.; PEREZ GARCIA, V. **Evaluation of city refuse compost maturity: a review**. *Biological Wastes*, v. 27, n. 2, p. 115-142, 1989.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA (IPT). Disponível em: [http://www.ipt.br/consultas\\_online](http://www.ipt.br/consultas_online)>. Acesso em 20/11/2017.

JAMBECK, J.R.; GEYER, R.; WILCOX, C.; (...), NARAYAN, R.; LAW, K.L. **Plastic Waste inputs from land into the ocean**. *Science*, v. 347, n. 6223, p. 768-771, 2015.

KALAMDHAD, A.; PASHA M.; KAZMI A.; 2008. **Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotary drum composter**. *Resources Conservation and Recycling*, 54, 829-834.

KALE, G.; AURAS, R.; SINGH, S.P.; NARAYAN, R. **Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions**. *Polymer Testing*, v. 26, n. 8, p. 1049-1061, 2007.

KELESSIDIS, A.; STASINAKIS, A.S. **Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries**. *Waste Management*, v. 32, n. 6, p. 1186-1195, 2012.

KENNEDY, C.; CUDDIHY, J.; ENGEL-YAN, J. **The changing metabolism of cities**. *Journal of Industrial Ecology*, v. 11, n. 2, p. 43-59, 2007.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985.

KIEHL, E. J.. **Manual de Compostagem - Maturação e Qualidade do Composto**. Edição própria; Piracicaba, 1998

KLEMES, J.J.; VARBANOV, P.S.; HUISINGH, D.; 2012. **Recent cleaner production advances in process monitoring and optimisation**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 34, 1-8.

KOVACS, R.; HAZI, F.; CSIKOR, Z.; MIHALTZ, P.; **Connection between oxygen uptake rate and carbon dioxide evolution rate in aerobic thermophilic sludge digestion.** Periodica Polytechnica-Chemical Engineering, pp17-22, Hungary. 2007.

KREUSCH, M. A. **Avaliação com propostas de melhoria do processo industrial de reciclagem do chumbo e indicação de aplicabilidade para a escória gerada.** 2005. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

KUTER, G. A. **Biosolids composting.** Water Environmental Federation, Alexandria, VA, 1995.

LASARIDI, K.; LOANNA, P; KOTSOU M, P; THAKIS, M.G. **Quality assessment of composts in the greek market: the need for standards and quality assurance.** Journal of Environmental anagement, London, v. 80, p. 58-65, 2006.

LASARIDI, K.E.; STENTIFORD, E.I. **A simple respirometric technique for assessing compost stability.** Water Research, v. 32, n. 12, p. 3717-3723, 1998.

LAY, J.J.; LEE, Y.J.; NOIKE, T. **Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid Waste.** Water Research, v. 33, n. 11, p. 2579-2586, 1999.

LELIS, M.P.N.; PEREIRA NETO, J. T. **A contaminação biológica na compostagem.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21.; 2001, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABES, 2001

LIANG, C.; DAS, K.C.; MCCLENDON, R.W. **The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend.** Bioresource Technology, v. 86, n. 2, p. 131-137, 2003.

LOPES, Paulo Alexandre. **Estudo Comparativo e Avaliação de Diferentes Sistemas de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

MACKENZIE, L. D. **Water and wastewater engineering: Design principles and practice.** Ed. McGraw-Hill Companies, 2010.

MAIORINO, L. *et al.* **Applicazione della metodologia di Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) alla gestione di fanghi di depurazione. Rapporto sullo stato ambientale delle acque nel bacino scolante dei regi lagni e nelle aree afferenti l'impianto di depurazione di Cuma.** 2002, Bologna, Itália. Disponível em: <http://www.bologna.enea.it/ambtd/regi-lagni/volume-6/00-vol6.pdf>. Acesso em: 06/02/2018.

MARAGNO, E. S.; TROMBIN, D. F.; VIANA, E. **O uso da serragem no processo de minicompostagem.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, 2007.

MARI, I.; EHAIOTIS, C.; KOTSOU, M.; BALIS, C.; GEORGAKAKIS, D. **Respiration profiles in monitoring the composting of by-products from the olive oil agro-industry.** Bioresource Technology, v. 87, n. 3, p. 331-336, 2003.

MARINARI, S.; MASCIANDARO, G.; CECCANTI, B.; GREGO, S. **Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties.** Bioresource Technology, v. 72, n. 1, p. 9-17, 2000.

MARTINS, João E.M. Perea *et al.* **Desenvolvimento de um Sistema Computacional Para Automação e Gerenciamento de Processos de Compostagem de Resíduos Sólidos**. In: XVI SIMPEP - 2009, Bauru. Anais... Bauru: SIMPEP, 2009.

MCKAY, G. **Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid Waste (MSW) incineration: Review**. Chemical Engineering Journal, v. 86, n. 3, p. 343-368, 2002.

MELLANBY, K. **Biologia da poluição**, Tradução Lúcia Baungartner Lamberti; revisão técnica e notas Antonio Lamberti. 2. ed.; v. 28, p. 3. São Paulo: EPU, 1982. MILARÉ, E.; MACHADO, P. A. L. Direito Ambiental. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2011.

METCALF, L.; EDDY, H.P.; **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse**. New York, Ed. McGraw-Hill, p. 1334. 2002.

MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C. **Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos** - condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. Rio de Janeiro, ABES, 2006.

MOHAN, D.; SINGH, K.P. **Single- and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse - An agricultural Waste**. Water Research, v. 36, n. 9, p. 2304-2318, 2002.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU JÚNIOR, C. H. **Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em Nitossolo Háplico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.39, p. 1796-1805, 2015.

NAKADA, N.; TANISHIMA, T.; SHINOHARA, H.; KIRI, K.; TAKADA, H. **Pharmaceutical chemicals and endocrine disrupters in municipal Wastewater in Tokyo and their removal during activated sludge treatment**. Water Research, v. 40, n. 17, p. 3297-3303, 2006.

NAMASIVAYAM, C.; KAVITHA, D. **Removal of Congo Red from water by adsorption onto activated carbon prepared from coir pith, an agricultural solid waste**. Dyes and Pigments, v. 54, n. 1, p. 47-58, 2002.

NAMKOONG, W.; HWANG, E.-Y.; PARK, J.-S.; CHOI, J.Y. **Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting**. Environmental Pollution, v. 119, n. 1, p. 23-31, 2002.

NDEGWA, P.M.; THOMPSON, S.A. **Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids**. Bioresource Technology, v. 76, n. 2, p. 107-112, 2001.

NICHOLSON, F.A.; SMITH, S.R.; ALLOWAY, B.J.; CARLTON-SMITH, C.; CHAMBERS, B.J. **An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales**. Science of the Total Environment, v. 311, Edições 1-3, p. 205-219, 2003.

OCHI, S. **Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites**. Mechanics of Materials, v. 40, n. 4-5, p. 446-452, 2008.

OLIE, K.; VERMEULEN, P.L.; HUTZINGER, O. **Chlorodibenzo-p-dioxins and chlorodibenzofurans are trace components of fly ash and flue gas of some municipal incinerators in The Netherlands**. Chemosphere, v. 6, n. 8, p. 455-459, 1977.

OLIVEIRA, A. M. G. **Compostagem caseira de lixo orgânico doméstico**. Bahia: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2005.

PAGANS, E.; BARRENA, R.; FONT, X.; SÁNCHEZ, A. **Ammonia emissions from the composting of different organic Wastes. Dependency on process temperature**. Chemosphere, v. 62, n. 9, p. 1534-1542, 2006

PALETSKI, W.T.; YOUNG, J.C. **Stability measurement of biosolids compost by aerobic respirometry**. Compost Science and Utilization, v. 3, n. 2, p. 16-24, 1995.

PANDEY, A. **Solid-state fermentation**. Biochemical Engineering Journal, v. 13, n. 2-3, p. 81-84, 2003.

PEDRO, A. F. P.; FRANGETTO, F. W. **Direito Ambiental Aplicado**. In: PHILIPPI JR, A.; ROMERO, M. A.; BRUNA, G. C. In: Curso de Gestão Ambiental. ed.5 São Paulo: Manole, 2011.

PEDROZA, M.M.; VIEIRA, G.E.G, SOUZA, J.F.; PICKLER, A.C.; LEAL, E.R.M. MILHOMEN, C.C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto** - uma revisão. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v.11, n. 16, p 89, 2010.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. Belo Horizonte: UNICEF, 1996.

PETIOT, C.; GUARDIA, A. **Composting in a Laboratory Reactor: A Review**. Compost Science & Utilization, v.12, n.1, p.69-79, 2004.

PINHO, P. M.; **Avaliação dos planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos na Amazônia brasileira**. 2011. 249 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Programa de Pós-Graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PONSÁ, S.; PAGANS, E.; SÁNCHEZ, A. **Composting of dewatered Wastewater sludge with various ratios of pruning Waste used as a bulking agent and monitored by respirometer**. Biosystems Engineering, v. 102, n. 4, p. 433-443, 2009.

REID, B.J.; FERMOR, T.R.; SEMPLE, K.T. **Induction of PAH-catabolism in mushroom compost and its use in the biodegradation of soil-associated phenanthrene**. Environmental Pollution, v. 118, n. 1, p. 65-73, 2002.

RIBEIRO, L. C. **Compostagem de lodo de esgoto: caracterização e bioestabilização**. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. 2018

RODRIGUES, J. **Higiene e Ilusão: o lixo como invento social**. Rio de Janeiro: Nau, 1995.

RODRÍGUEZ, N.H.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; BLANCO-VARELA, M.T.; DONATELLO, S, GUILLEM, M.; PUIG J.; FOS, C.; LARROTCHA, E.; FLORES, J.; 2013. **The effect of using thermally dried sewage sludge as an alternative fuel on Portland cement clinker production**, Journal of Cleaner Production, Volume 52, 94-102.

ROIG, A.; CAYUELA, M.L.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A. **An overview on olive mill Wastes and their valorisation methods**. Waste Management, v. 26, n. 9, p. 960-969, 2006.

ROSA, M.F.; CHIOU, B.-S.; MEDEIROS, E.S.; (...), ORTS, W.J.; IMAM, S.H. **Biodegradable composites based on starch/EVOH/glycerol blends and coconut fibers.** Journal of Applied Polymer Science, v. 111, n. 2, p. 612-618, 2009.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de resíduos sólidos.** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2003. Disponível em:  
<[http://www1.ci.uc.pt/mhidro/edicoes\\_antigas/Tratamentos\\_Residuos\\_Solidos.pdf](http://www1.ci.uc.pt/mhidro/edicoes_antigas/Tratamentos_Residuos_Solidos.pdf)>  
Acesso em 06 outubro 2017.

SAID-PULLICINO, D.; ERRIQUENS, F.G.; GIGLIOTTI, G. **Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity.** Bioresource Technology, v. 98, n. 9, p. 1822-1831, 2007.

SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A.; ROIG, A.; PAREDES, C.; BERNAL, M.P. **Nitrogen transformation during organic Waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures.** Bioresource Technology, v. 78, n. 3, p. 301-308, 2001.

SANTAELLA, S. T. et al. **Resíduos sólidos e a atual política ambiental brasileira.** Fortaleza: UFC/ LABOMAR/ NAVE, p. 11-23, 2014.

SANTOS, J.L.D. dos. **Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis.** Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007

SCAGLIA B.; ERRIQUENS F.G.; GIGLIOTTI G. ; TACCARI M.; CIANI M. ; GENEVINI P.L.; ADANI F. **Precision determination for the specific oxygen uptake rate ( SOUR ) method used for biological stability evaluation of compost and biostabilized products.** Università degli Studi di Milano, Università di Perugia, Università Politecnica delle Marche, pp0-8 , 2005 .

SCAGLIA, B.; TAMBONE, F.; GENEVINI, P.L.; ADANI, F. **Respiration index determination: Dynamic and static approaches.** Compost Science and Utilization, v. 8, n. 2, p. 90-98, 2000.

SCOTON, E.J.; BATTISTELLE, R.A.G.; BEZERRA, B.S.; AKUTSU, J. **A sewage sludge co-composting process using respirometric monitoring method in hermetic rotary reactor.** Journal of Cleaner Production, v. 121, p. 169-175, 2016.

SCOTON, E.J.; BATTISTELLE, R.A.G.; BEZERRA, B.S.; RENÓFIO, A.; AKUTSU, J. **Parameters evaluation of the co-composting of sewage sludge and grass clippings using the respirometric method.** International Journal of Environment and Waste Management, v. 16, n. 3, 2015.

SHARHOLY, M.; AHMAD, K.; MAHMOOD, G.; TRIVEDI, R.C. **Municipal solid Waste management in Indian cities - A review.** Waste Management, v. 28, n. 2, p. 459-467, 2008.

SHARPLEY, A.; MOYER, B. **Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall.** Journal of Environmental Quality, v. 29, n. 5, p. 1462-1469, 2000.

SILVA, A G. *et al.* **Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 371-379, 2008.

SIMS, J.T.; KLINE, J.S. **Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composed sewage sludge.** Journal of Environmental Quality, v. 20, n. 2, p. 387 a 395, 1991.

SRIVASTAVA, V.C.; SWAMY, M.M.; MALL, I.D.; PRASAD, B.; MISHRA, I.M. **Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 272, Edições 1-2, p. 89-104, 2006.

TOCCHETTO, M. R. L. **Implantação de Gestão Ambiental em Grandes Empresas com Atividade Galvânica no Rio Grande do Sul.** 2004. 176 p. Doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Engenharia Metalúrgica, dos Materiais e de Minas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

UBAY E.; OZDEMIR S.; KARAHAN O.; INSEL G.; ORHON D.; **Critical appraisal of respirometric methods for metal inhibition on activated sludge.** Journal of Hazardous Materials B139332-339.; 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - U.S.EPA. **A plain English guide to the EPA Part 503 Biossolids Rule.** Whashington, 1994

VAN DER BRUGGEN, B.; VANDECASTEELE, C.; VAN GESTEL, T.; DOYEN, W.; LEYSEN, R. **A review of pressure-driven membrane processes in Wastewater treatment and drinking water production.** Environmental Progress, v. 22, n. 1, p. 46-56, 2003.

VAN GINKEL, S.; SUNG, S.; LAY, J.J. **Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration.** Environmental Science and Technology, v. 35, n. 24, p. 4726-4730, 2001.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.1. UFMG, 1995.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lodos ativados.** Minas Gerais: Editora Segrac, 2. Ed, v. 4. 2002.

WEILAND, M.; DARO, A.; DAVID, C. **Biodegradation of thermally oxidized polyethylene.** Polymer Degradation and Stability, v. 48, n. 2, p. 275-289, 1995.

WERTHER, J.; OGADA, T. **Sewage sludge combustion.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 25, n. 1, p. 55-116, 1999.

ZANETI, I.C.B. **Educação Ambiental, resíduos sólidos urbanos e sustentabilidade. Um estudo de caso.** Porto Alegre, RS. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável-UnB. Brasília, 2003.

ZHANG, R.; EL-MASHAD, H.M.; HARTMAN, K.; (...), CHOATE, C.; GAMBLE, P. **Characterization of food Waste as feedstock for anaerobic digestion** Bioresource Technology, v. 98, n. 4, p. 929-935, 2007.

ZUCCONI, F.; PERA, A.; FORTE, M.; DE BERTOLDI, M. **Evaluating toxicity of immature compost.** BioCycle, v. 22, n. 2, p. 54-57, 1981.