



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (RECURSOS
HÍDRICOS)

ROANI SIMÕES VERAS

COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE ALIMENTOS E PODAS TRITURADAS DE
ÁRVORES EM LEIRAS ESTÁTICAS COMO MECANISMO DE REDUÇÃO DE GEE

FORTALEZA
2018

ROANI SIMÕES VERAS

COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE ALIMENTOS E PODAS TRITURADAS DE
ÁRVORES EM LEIRAS ESTÁTICAS COMO MECANISMO DE REDUÇÃO DE GEE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

Coorientador: Prof. Dr. Ari Clecius.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V584c Veras, Roani Simões.

Compostagem de resíduos de alimentos e podas trituradas de árvores em leiras estáticas como mecanismo de redução de GEE / Roani Simões Veras. – 2018.
110 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

Coorientação: Prof. Dr. Ari Clecius Alvez de Lima.

1. Compostagem. 2. Resíduos orgânicos. 3. Gases de efeito estufa. 4. Aeração passiva. I. Título.

CDD 628

ROANI SIMÕES VERAS

COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE ALIMENTOS E PODAS TRITURADAS DE
ÁRVORES EM LEIRAS ESTÁTICAS COMO MECANISMO DE REDUÇÃO DE GEE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 29/10/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ari Clecius Alvez de Lima (Coorientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alceu de Castro Galvão

Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados do Estado do Ceará (ARCE)

A sociedade.

Aos meus pais, Luciene e Delano.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial minha mãe, por sempre incentivar meu desenvolvimento acadêmico.

Ao meu falecido pai que acompanhou e vibrou intensamente minha entrada no mestrado.

Aos meus queridos amigos e minha namorada Deborah que em momentos de cansaço e preocupações me apoiaram e depositaram confiança em mim.

Aos estagiários Vitor, Juliana, Lucas, Samuel, Amanda, Joyce, Nayara, Mayara e Henrique com suas importantíssimas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do DEHA, NUTEC e LABOSAN por sempre se mostrarem solícitos e interessados nas questões experimentais e estruturais da pesquisa.

Ao meu orientador Ronaldo Stefanutti por possibilitar o desenvolvimento do trabalho sempre com conselhos pertinentes, carinho e atenção.

Ao meu coorientador Ari Clecius pelo auxílio e acompanhamento durante a execução do trabalho.

Ao NUTEC por me conceder o espaço físico e mão de obra necessária para a montagem do experimento.

Ao LARSE, LARBIL e LABOSAN por me proporcionarem os materiais e equipamentos para as análises físicas e químicas.

Aos queridos funcionários João e Paulo do NUTEC, sempre prestativos em me ajudar na montagem das leiras.

À COSAMPA por fornecer as podas trituradas que foram um material essencial para o trabalho.

À CAPES, FINEP e CNPQ, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Aos professores Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota e Prof. Dr. Alceu de Castro Galvão, participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores que ao longo da minha vida contribuíram para que eu pudesse estar aqui hoje concluindo essa importante etapa.

À todos que de alguma forma me inspiraram, contribuíram e incentivaram.

“Revolucionário é todo aquele que quer mudar o mundo e tem a coragem de começar por si mesmo.”

Sérgio Vaz

RESUMO

O método de compostagem em leiras estáticas com aeração passiva apresenta vantagens em relação à simplicidade operacional e redução de custos devido a não necessidade de revolvimentos e redução de emissões de gases de efeito estufa. Este trabalho teve como objetivo a comparação dos métodos de compostagem em leiras revolvidas e leiras estáticas com aeração passiva durante 135 dias, utilizando restos de alimentos dos restaurantes universitários e podas trituradas da zona urbana de Fortaleza. Para tanto foram analisados os parâmetros: temperatura, umidade, pH, relação C/N, condutividade elétrica, índice de germinação e balanço de massa. Para uma leira estática específica (EP100) foi monitorada a composição dos gases O₂, CO₂ e CH₄ na fase de degradação ativa. Foram montadas no total 12 leiras com alturas de 0,50 m, 0,75 m e 1,00 m; com duas formas de operação, revolvidas (R) e estáticas (E); e duas formas de montagem, mistura prévia (P) e camadas alternadas (C). A leira EP100 se destacou das demais testadas por ser a única a atingir a temperatura e período dentro do padrão de higienização estabelecido pela recente Resolução CONAMA 481/2017. Esta forma de tratamento também atendeu aos parâmetros da Instrução Normativa 25/2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, com exceção da umidade. Ao contrário, as leiras estáticas montadas em camadas alternadas (ECs) estiveram fora dos parâmetros de qualidade para temperatura, umidade e índice de germinação. As leiras EPs e RPs apresentaram redução de massa acima de 75 % em base seca. Quanto ao monitoramento dos gases da leira EP100, a concentração de gás oxigênio se manteve acima de 15 % e não houve detecção de gás metano. Diante dos resultados apresentados fica evidente a eficiência da compostagem em leiras estáticas com aeração passiva para alturas de 1,00 m e condições estabelecidas no trabalho. Tal método é indicado para o tratamento de resíduos orgânicos em pequenas e grandes comunidades.

Palavras-chave: Compostagem. Resíduos Orgânicos. Gases de efeito estufa. Aeração passiva. Restos de alimentos. Podas trituradas.

ABSTRACT

The passively aerated windrow composting method has advantages in terms of operational simplicity and cost reduction due to the fact that there is no need of stirring and reduction of greenhouse gas emissions. This paperwork objective was the comparison of two different composting methods in a period of 135 days: turned windrow composting and passively aerated windrow. It was used food wastes from the local restaurants in the university and tree pruning from Fortaleza urban area. The following parameters were analyzed: temperature, moisture, pH, C/N ratio, electrical conductivity, seed germination index and mass balance. The O₂, CO₂ and CH₄ gases composition in the active degradation phase was monitored for a specific static pile (EP100). A total of 12 windrows were installed with heights of 0,50 m, 0,75 m and 1,00 m; with two different types of operation: stirred (R) and static (E); and two forms of assembly, premixed (P) and alternate layers (C). The EP100 windrow stood out from the others tested because it was the only one to reach the temperature and period within the hygiene standard established by the recent CONAMA 481/2017. This treatment method also met the parameters of Normative Instruction 25/2009 of the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply, with the exception of moisture. On the other hand, the static piles assembled in alternate layers (ECs) have not met the quality standards for temperature, humidity and seed germination index. The EPs and RPs presented mass reduction above 75% on a dry basis. Regarding the EP100 gases monitoring, the oxygen gas concentration remained above 15% and there was no detection of methane gas. According to the results, the passively aerated windrow composting for heights of 1.00 m and conditions established in the paperwork have shown its efficiency. This method is indicated for organic waste treatment in small and large communities.

Keywords: Composting. Organic Wastes. Greenhouse Gases. Passive Aeration. Food Waste. Tree Pruning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Disposição final dos RSU coletados no Brasil em 2016	25
Figura 2	- Valores de pH durante a compostagem	39
Figura 3	- Sistema de leiras revolvidas.....	42
Figura 4	- Sistema de compostagem com leira estática aerada	44
Figura 5	- Leira estática com túnel de ventilação	46
Figura 6	- Modelos de Compostagem	56
Figura 7	- Desenvolvimento da pesquisa.....	59
Figura 8	- Área de compostagem no NUTEC, Campus do PICI.....	61
Figura 9	- Recipiente para armazenamento dos restos de alimentos.....	62
Figura 10	- Recebimento das podas.....	62
Figura 11	- Configuração do delineamento da pesquisa.....	63
Figura 12	- Configuração pátio de compostagem.....	65
Figura 13	- Vista do processo de homogeneização prévia dos resíduos em betoneira.....	66
Figura 14	- Montagem das leiras em camadas alternadas	66
Figura 15	- Revolvimento com enxadadas leiras de compostagem.....	67
Figura 16	- Sistema de irrigação com tubos micro perfurados nas leiras.....	68
Figura 17	- Coleta de amostra nas leiras de compostagem.....	69
Figura 18	- Recipiente utilizado na coleta de amostras nas leiras de compostagem.....	70
Figura 19	- Termopar para monitoramento da temperatura das leiras de compostagem	71
Figura 20	- Detalhamento dos pontos de amostragem da medição dos gases.....	72
Figura 21	- Leitura dos gases na leira EP100 com GEM 5000	72
Figura 22	- Detalhe do sistema de drenagem e equipamento GEM 5000	73
Figura 23	- Médias de temperatura para leiras com 0,50 m de altura	77
Figura 24	- Médias de temperatura para leiras com 0,75 m de altura	77
Figura 25	- Médias de temperatura para leiras com 1,00 m de altura	78
Figura 26	- Estratificação de temperatura para Leiras EP100 e RP100	81
Figura 27	- Médias de umidade para Leiras com 0,50 m de altura	82
Figura 28	- Médias de umidade para Leiras com 0,75 m de altura	83
Figura 29	- Médias de umidade para Leiras com 1,00 m de altura	83
Figura 30	- Médias de pH para Leiras com 0,50 m de altura	86
Figura 31	- Médias de pH para Leiras com 0,75 m de altura	86
Figura 32	- Médias de pH para Leiras com 1,00 m de altura	87

Figura 33 - Variação da relação C/N em leiras com 0,50 m de altura	89
Figura 34 - Variação de relação C/N em leiras com 0,75 m de altura	89
Figura 35 - Variação de relação C/N em leiras com 1,00 m de altura	90
Figura 36 - Leitura de composição gases na leira EP100.....	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Pontos positivos e negativos da compostagem	30
Quadro 2	- Temperatura necessária para higienização da compostagem	32
Quadro 3	- Relações de C/N ótimas para a compostagem	37
Quadro 4	- Classificação do composto em função do uso agrícola.....	48
Quadro 5	- Condições de inativação de parasitas e microrganismos patogênicos	50
Quadro 6	- Limites máximos de contaminantes de acordo com IN 27/2006 do MAPA.....	52
Quadro 7	- Exigência dos parâmetros para fertilizantes mistos e compostos	53
Quadro 8	- Identificação das leiras	64
Quadro 9	- Metodologias das análises	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Caracterização dos resíduos utilizados para compor as leiras de compostagem.	75
Tabela 2	- Comparação das temperaturas de acordo com os fatores analisados	79
Tabela 3	- Representação das médias de condutividade elétrica e índice de germinação	92
Tabela 4	- Balanço de massa para leiras com mistura prévia.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
CE	Condutividade Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CR	Crescimento Radicular
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
EC50	Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m
EC75	Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m
EC100	Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m
EP50	Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m
EP75	Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m
EP100	Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
H ₃ PO ₄	Ácido Fosfórico
IG	Índice de Germinação
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de Potássio
LABOSAN	Laboratório de Saneamento Ambiental
LARSE	Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NT	Nitrogênio Total
NUTEC	Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará
PGRS	Porcentagem de Germinação de Sementes Relativa
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RC50	Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m
RC75	Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m
RC100	Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m
RP50	Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m
RP75	Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m

RP100	Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RU	Restaurante Universitário
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente do Ceará
UDC	Unidades Descentralizadas de Compostagem
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UTC	Usinas de Triagem e Compostagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Geral	20
2.2	Específicos	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Problemática dos resíduos sólidos.....	21
3.2	Compostagem.....	26
3.2.1	<i>Conceito</i>	26
3.2.2	<i>Benefícios</i>	28
3.2.3	<i>Etapas da Compostagem</i>	30
3.3	Fatores que influenciam a compostagem	31
3.3.1	<i>Temperatura</i>	32
3.3.2	<i>Umidade</i>	33
3.3.3	<i>Aeração e revolvimento</i>	34
3.3.4	<i>Relação carbono/nitrogênio (C/N)</i>	36
3.3.5	<i>pH</i>	38
3.3.6	<i>Microrganismos</i>	39
3.4	Métodos de compostagem	40
3.4.1	<i>Leiras revolvidas</i>	41
3.4.2	<i>Leiras estáticas com aeração forçada</i>	43
3.4.3	<i>Reatores fechados</i>	44
3.4.4	<i>Leiras estáticas com aeração passiva</i>	45
3.5	Maturação e qualidade do composto	47
3.5.1	<i>Metais pesados e microrganismos patogênicos</i>	49
3.5.2	<i>Fitotoxicidade e condutividade elétrica</i>	50
3.5.3	<i>Legislação</i>	51
3.6	Práticas centralizada <i>versus</i> práticas descentralizadas de compostagem	53
3.7	Compostagem como método de redução de GEE.....	56
4	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1	Generalidades	59
4.2	Montagem e desenvolvimento.....	62
4.3	Monitoramento do experimento.....	68

4.4	Análise dos dados.....	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1	Caracterização dos resíduos	75
5.2	Temperatura	76
5.3	Umidade.....	81
5.4	pH.....	85
5.5	Relação C/N.....	87
5.6	Condutividade elétrica e índice de germinação	90
5.7	Composição dos gases - O ₂ , CO ₂ e CH ₄	92
5.8	Balço de massa	94
6	CONCLUSÕES	96
7	RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – ESTRATIFICAÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO PERFIL VERTICAL	105
	APÊNDICE B – MONITORAMENTO TEMPERATURA	108

1 INTRODUÇÃO

A destinação correta dos resíduos sólidos é um dos grandes problemas amplamente debatidos nos diversos setores da sociedade em meio a uma crescente geração destes. Segundo o relatório Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), no Brasil são gerados anualmente cerca de 78,3 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), caracterizados pela fração domiciliar e de varrição pública, dos quais apenas 58,4% são encaminhados para aterros sanitários. Quando o relatório se limita à região Nordeste, a situação piora devido aos menores investimentos de limpeza e coleta pública.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 de 2010 determinou a erradicação dos lixões e aterros controlados. Entretanto, atualmente grande parte dos municípios continua destinando seus resíduos de forma incorreta. A referida lei estabelece como base para a gestão de resíduos a seguinte hierarquia de prioridades: não geração; redução; reaproveitamento; reciclagem; aproveitamento energético e disposição final. Portanto, os aterros sanitários deveriam receber apenas os rejeitos, ou seja, o que não for capaz de ser reaproveitado.

É necessária a implantação de meios alternativos de tratamento que evitem o aterramento dos resíduos, devido ao fato dos aterros sanitários serem obras que demandam grandes áreas com altos custos e impactos ambientais inerentes. Essa problemática abre espaço para soluções como reciclagem e compostagem dos materiais que, entre outros benefícios, aumentam a vida útil dos aterros sanitários. Apesar de mais da metade dos RSU ser matéria orgânica passiva de ser compostada, esse tipo de tratamento tem pouca atenção por parte dos gestores públicos.

Compostagem é a decomposição aeróbia dos resíduos orgânicos com o objetivo de transformar o material original em um composto orgânico como produto das reações biológicas. Esse produto com benéficas características físicas, químicas e biológicas para o solo pode ser utilizado como fertilizante, condicionador de solo ou substrato para as plantas. Além da produção do composto orgânico, a compostagem deve ser vista como um serviço ambiental, visto que é uma forma de estabilização dos resíduos biodegradáveis, minimizando a geração de chorume e metano.

Como o processo é aeróbio, deve ser adicionado oxigênio às leiras de compostagem para suprir as necessidades dos microrganismos. Geralmente o gás oxigênio é

fornecido com o revolvimento das leiras, que pode ser mecânico, utilizando máquinas, ou manual, a depender principalmente da quantidade de resíduos que deve ser tratada diariamente. O suprimento de oxigênio das leiras também pode ocorrer de maneira forçada com a utilização de bombas de insuflação e sucção ou passiva quando o gás entra em contato com a massa em processo através do vento.

A compostagem em leiras com aeração passiva apresenta a vantagem da ausência de revolvimentos, reduzindo os custos com mão de obra e a demanda por maiores áreas. Comumente são empregadas estruturas como túneis de ventilação e tubulações de policloreto de vinila para facilitar a passagem do ar através das leiras. Já o método UFSC, desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina, tem uma maior preocupação na arquitetura da leira no momento de sua formação.

O presente trabalho apresenta a proposta de um método de compostagem de restos de alimentos e podas trituradas de árvores urbanas em leiras com aeração passiva de forma simplificada. O termo simplificada se deve ao fato de não ser utilizado nenhum tipo de estrutura para auxiliar a aeração. Foram manuseadas leiras com duas formas de operação (com e sem revolvimento), diferentes modos de montagem (com homogeneização prévia e estratificação em camadas) e três diferentes alturas.

Na leira com 1,00 m de altura, estática e montada com mistura prévia foi analisada a composição de O_2 , CO_2 e CH_4 na fase de degradação ativa com o intuito de avaliar se a aeração passiva fornece o gás oxigênio em quantidades demandadas pelos microrganismos e se havia liberação de metano.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Testar metodologia de compostagem de resíduos de alimentos e podas de árvores trituradas em leiras estáticas com aeração passiva.

2.2 Específicos

- avaliar os efeitos da altura das leiras de compostagem quanto aos parâmetros temperatura e umidade;
- quantificar os parâmetros temperatura, umidade, pH, relação C/N, condutividade elétrica e índice de germinação do compostos produzidos em relação às normas e comparar com dados da literatura.
- determinar as reduções de massa para as leiras de compostagem com mistura prévia;
- determinar a composição de O₂, CO₂ e CH₄ para a leira EP100 durante o processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentadas as problemáticas que envolvem a gestão dos resíduos sólidos; etapas e fatores determinantes que afetam o processo de compostagem; os principais métodos empregados; aspectos sobre qualidade do composto e legislações que norteiam o processo; comparação de compostagem de forma centralizada e descentralizada e compostagem como método de redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE).

3.1 Problemática dos resíduos sólidos

Problemas associados aos resíduos sólidos estão se aglomerando nos países em desenvolvimento e a necessidade de mudança na gestão desses resíduos é cada vez mais evidente, principalmente nos grandes centros urbanos. De acordo com Pereira e Gonçalves (2011), a crescente geração de resíduos ocorre devido ao modelo de industrialização fundamentado na exploração dos recursos ambientais, além do crescimento populacional e uma cultura consumista. Pereira Neto (2014) comenta que o constante desenvolvimento industrial causa tanto o aumento do volume gerado de resíduos quanto alteração da composição destes, oriundos de produtos de baixa vida útil e utilizados nas mais diversas atividades humanas.

As adversidades geradas em decorrência do elevado consumismo e resultante produção não sustentável de resíduos passaram a ser debatidas pela sociedade de uma forma mais geral a partir do final do século XX (RIBEIRO; MORELLI, 2009). Entretanto, Jucá *et al.* (2014) comentam que, apesar da evolução das discussões sobre a gestão de resíduos sólidos, um dos componentes básicos do saneamento, os gestores públicos não tem demonstrado merecido tratamento ao assunto.

De acordo com Barros (2012), o Brasil está gerações atrás de países mais desenvolvidos em relação aos problemas sobre gestão de resíduos, onde soluções foram implantadas anteriormente, e hoje é comum o incentivo a minimização e valorização dos resíduos.

Para Alves e Ueno (2015), ao longo dos séculos, a maneira de resolver o acúmulo de resíduos nas cidades foi baseada na coleta e afastamento dos resíduos dos centros urbanos, criando uma sensação na sociedade que o problema foi contornado, contudo, com o tempo, aparecem as consequências da falta de tratamento. Segundo Zurbrügg *et al.*(2002), com a

expansão das cidades tornou-se mais difícil encontrar locais para disposição dos resíduos, aumentando o custo do transporte para regiões mais distantes dos centros urbanos.

Segundo a ABRELPE (2016), o Brasil produz 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos anualmente, 2% a menos que o total gerado em 2015, com uma geração *per capita* de 1,04 kg/hab./dia. Apesar do crescimento populacional, a diminuição da geração de resíduos está relacionada ao momento econômico do país e redução do poder de compra da população.

Cestonaro (2018) comenta que tanto o aumento constante na geração de resíduos quanto a falta de uma regulamentação nacional até 2010 contribuem para a situação insustentável na gestão dos resíduos. Para mudar a situação são necessárias alterações em nível organizacional e tecnológico que concretizem um novo conceito integrado e sustentável na gestão dos resíduos (FRICKE; PEREIRA, 2015).

As soluções buscadas para o gerenciamento dos resíduos devem ser feitas de forma integral, analisando e modificando o que ocorre à montante da geração dos produtos de consumo, e não apenas com foco na destinação final ambientalmente adequada (BARROS, 2012). O autor complementa que essa perspectiva mais abrangente deve levar em conta aspectos culturais, socioeconômicos, ambientais, administrativos, políticos e até mesmo éticos com uma visão coletiva, pois o resíduo é consequência e não causa.

Para Ribeiro e Morelli (2009), uma gestão adequada depende de uma sinergia entre os diversos setores: geradores dos resíduos, empresas que buscam soluções alternativas, organizações não governamentais, sociedade e governo, que deve dar preferências às empresas, produtos e serviços que tenham responsabilidade com as questões ambientais.

O mau gerenciamento dos resíduos sólidos acarreta em problemas ambientais, sociais, financeiros e de saúde pública. Barros (2012) entende que os resíduos são destinados incorretamente pela desinformação das consequências ocasionadas por essas atividades, além da falta de pessoal capaz e recursos financeiros. O autor lista os principais problemas da má disposição dos resíduos sólidos:

- a) a poluição das águas superficiais e subterrâneas, pela geração e pelo escoamento do lixiviado (popularmente conhecido como chorume ou sumeiro), que contamina de modo direto o lençol freático, podendo portanto, ao atingir os corpos d'água, comprometer vegetais aquáticos e animais;
- b) a poluição dos solos, por acúmulo de metais pesados – inclusive eventualmente presentes no composto – e pela presença de outras substâncias perigosas (tais como alguns produtos químicos), apresentando risco à saúde humana, por expedição direta ou por ingestão acidental;
- c) a poluição do ar, em que aparecem distúrbios respiratórios, causados pela poeira, fumaça, maus cheiros, e os efeitos irritantes de algumas substâncias

(eventualmente perigosas), além de irritação da mucosa ocular, com riscos de acidentes;

d) a obstrução de dispositivos componentes dos sistemas urbanos de drenagem de águas pluviais (bocas de lobo, canais *etc*). Tal ocorrência é muito comum no Brasil, onde chuvas concentradas exigem estruturas avantajadas que permitam boas condições de escoamento. Uma deficiência nos serviços de limpeza urbana – notadamente de coleta de resíduos também de varrição –, somada ao mau uso do solo e à pequena participação da população, faz com que quantidades significativas de resíduos relativamente volumosos de origem natural ou antrópica (folhas, papéis, plásticos, *etc*) fiquem retidas naqueles dispositivos, impedindo o seu funcionamento a contento. Essas dificuldades de funcionamento agravam, assim, alagamentos e inundações;

e) poluição visual, com impacto estético e emotivo (sensação de medo, de nojo);

f) a existência de animais, que podem causar risco à integridade física dos seres humanos;

g) a existência de seres humanos vivendo e trabalhando em condições deploráveis e submetidos a muitos riscos.

A falta de tratamento e destinação incorreta dos resíduos estão associadas à mudança do clima. Nos países em desenvolvimento, 8 a 10% das emissões de gases de efeito estufa são devidas a má gestão dos resíduos, com uma grande quantidade de metano liberada na atmosfera com a degradação dos compostos orgânicos (FRICKE; PEREIRA, 2015).

Os resíduos orgânicos, ao contrário dos resíduos secos, entram mais facilmente em processo de decomposição com as ações de microrganismos e pequenos animais, contudo podem causar impactos negativos quando dispostos de forma irregular. Segundo Inácio e Miller (2009), estes resíduos podem ocasionar atração de moscas e vetores de doenças, poluição hídrica com dejetos de animais em meio rural, além de elevados custos de manejo com o tratamento de lodos sanitários.

Diversas atividades de diferentes setores econômicos naturalmente geram uma quantidade significativa de resíduos orgânicos. Estão presentes nos resíduos sólidos urbanos na manutenção de áreas verdes e restos de alimentos das residências, restaurantes e feiras. A agropecuária gera resíduos com os restos da produção de culturas e esterco da criação de animais. A indústria de alimentos é outra atividade com forte geração de resíduos orgânicos.

A necessidade de aproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos vem sendo amplamente desenvolvida com as legislações de diversos países. Na zona urbana, restos de alimentos e podas de árvores são exemplos de resíduos que são gerados em grandes quantidades e podem ser reciclados. Atualmente, a forma que o Brasil valoriza os resíduos orgânicos é principalmente com a compostagem, enquanto que países europeus utilizam também a digestão anaeróbica (CESTONARO, 2018).

A Lei nº 12.305, que instituiu a PNRS, estabelece como ordem de prioridade na gestão dos resíduos o seguinte ordenamento: evitar a sua produção; em seguida reduzir as

quantidades geradas; depois, reutilizar a maior parte possível, reciclando o que não puder ser reutilizado; a disposição final deve ser feita apenas com rejeitos (BRASIL, 2010). Ou seja, a presença de um aterro sanitário é necessária, contudo apenas para receber o que não for possível de recuperação (rejeitos). São apresentadas as definições de destinação final ambientalmente adequada e rejeitos pela referida lei:

VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

XV - rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

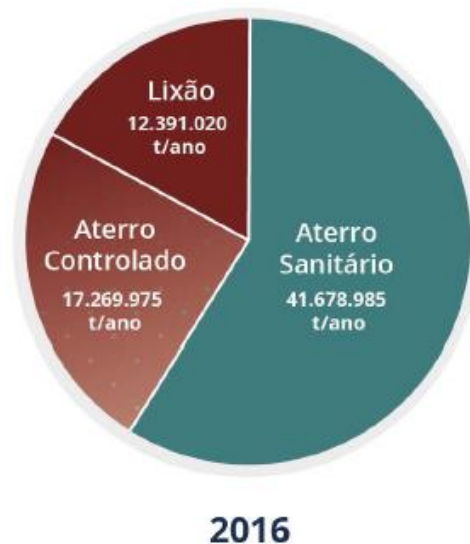
De acordo com a legislação, formas de tratamento como reciclagem e compostagem devem ser implementadas para minimizar a quantidade de resíduos enterrados. Entretanto, grande parte dos municípios brasileiros, principalmente os de menor porte, enfrentam como maior desafio na gestão dos resíduos a erradicação dos lixões e instalação de aterros sanitários que operem dentro das normas técnicas, estando reutilização e reciclagem fora dos principais objetivos.

Os aterros sanitários, apesar de necessários, são obras caras com pequena vida útil (cerca de 20 anos) e apresentam um custo relativo maior para municípios de pequeno porte (INÁCIO; MILLER, 2009). Soluções que buscam minimizar o deslocamento de resíduos para os aterros sanitários aumentam a vida útil destes, tornando a gestão dos resíduos mais sustentável.

Para Cestonaro (2018) apesar da legislação brasileira sobre os resíduos sólidos ser bem elaborada, se comparando com a de países europeus, os critérios estabelecidos em normas e leis não ocorrem na prática. A autora continua, que após mais de sete anos, as metas da Política Nacional de Resíduos Sólidos não são cumpridas devido às dificuldades culturais e falta de incentivos econômicos. Na Figura 1 é possível observar que em 2016 mais de 39 milhões de resíduos foram dispostos em lixões ou aterros controlados, o que representa 41,57% do total coletado (ABRELPE, 2016). O relatório Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil da ABRELPE (2016) relata que no mesmo ano mais de três mil municípios destinavam

seus resíduos de forma irregular e a região Nordeste é a que apresentava o menor índice de coleta, com valor de 79% em relação ao total gerado.

Figura 1 - Disposição final dos RSU coletados no Brasil em 2016



Fonte: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016).

O Plano Estadual de Resíduos Sólidos (2015), desenvolvido pela Secretaria do Meio Ambiente do Ceará (SEMA), relata que em 2015, 85% dos municípios do estado destinavam seus resíduos em lixões a céu aberto. O relatório informa que, até a mesma data, somente 6 dos 184 municípios destinavam os resíduos de forma correta em aterros sanitários.

A fração orgânica dos resíduos, de forma geral, possui elevado teor de água, o que dificulta sua incineração e geram problemas quando enterrados em aterros sanitários devido à liberação de gases e lixiviados. Em comparação a tais formas de tratamento o processo de compostagem se mostra uma interessante alternativa para estabilização do material biodegradável e reutilização como fertilizante (FONSECA, 2012).

A composição dos resíduos sólidos depende de diversos fatores, contudo a renda da população de uma determinada região é um dos mais relevantes. Nos países de baixa renda os resíduos orgânicos representam em média 64% do total, enquanto que nos países de alta renda esse valor é em torno de 28% (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012). Tais dados revelam a necessidade e oportunidade das nações em desenvolvimento buscarem processos de tratamento da parcela orgânica dos resíduos sólidos.

Existe uma preferência na reciclagem de materiais inorgânicos como papel, plástico, metal e vidro em detrimento dos orgânicos (embora representem mais da metade dos resíduos brasileiros), pois esses apresentam um menor valor de mercado e maior complexidade logística (CESTONARO, 2018). Segundo Inácio e Miller (2009), as matérias que recebem atenção na reciclagem de resíduos representam 12 a 13% do total gerado enquanto que a parcela orgânica dos resíduos sólidos domésticos reflete 45 a 60% do total gerado.

Em meio a esse cenário que a compostagem se mostra como um método de tratamento que deve ser visto como indispensável na estratégia do gerenciamento de resíduos orgânicos em meio urbano ou rural, independente do porte do município. Para Inácio e Miller (2009) é uma prática que auxilia nas soluções de problemas ambientais e ao mesmo tempo fornece um produto com efeitos benéficos ao solo para a agricultura tropical brasileira.

3.2 Compostagem

Os primeiros registros de compostagem ocorreram há cerca de 4500 anos na Mesopotâmia, passando a ser desenvolvida por várias civilizações antigas em que diversos materiais orgânicos eram amontoados em pilhas até se estabilizarem e estarem prontos para ser aplicados na agricultura (SANTOS, 2007). O método era realizado sem técnica especializada, até que no início do século XX Albert Howard desenvolveu na Índia um mecanismo de fabricação de fertilizantes orgânicos que os nativos obtinham de maneira empírica (KIEHL, 1985).

3.2.1 Conceito

Existem diferentes conceituações de compostagem, de acordo com área de estudo e com objetivo esperado. Segundo Inácio e Miller (2009), as definições podem variar com o enfoque agrônomo, ambiental ou microbiológico, contudo todas ressaltam os aspectos aeróbios e termofílicos.

A Resolução nº 481 de 2017, criada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define compostagem como:

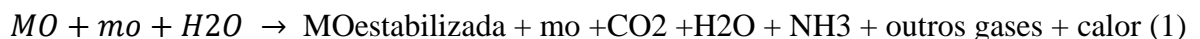
Compostagem: processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias e termofílicas, resultando em material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem.

Fonseca (2012) entende por compostagem um processo aeróbio de oxidação biológica exotérmica derivada das atividades de microrganismos atuando em uma biomassa de substrato heterogênea, transformando-a em um composto estável, higienizado e homogêneo.

Brewer et al. (2013) definem compostagem como um processo controlado da decomposição biológica da matéria orgânica de forma que os nutrientes do material original possam ser retornados para o meio. Segundo os autores, o composto produzido tem a capacidade de melhorar e aprimorar a qualidade do solo e conseqüentemente o crescimento das culturas.

Bactérias e fungos realizam a estabilização da matéria orgânica naturalmente, porém a decomposição pode ser acelerada quando o homem interfere fornecendo condições ideais para o desenvolvimento destes seres vivos. A compostagem é uma forma de obter mais rapidamente e em melhores condições um composto que na natureza levaria um tempo indeterminado de acordo com as condições em que o material se encontra (KIEHL, 1985).

De acordo com Belo (2011), em condições aeróbias a matéria orgânica (MO) se transforma em um produto estável após sua mineralização e humificação. Assim, como produtos das reações que ocorrem com os microrganismos (mo), formam-se dióxido de carbono, vapor d'água, amônia, entre outros gases com liberação de calor. O processo de compostagem pode ser demonstrado resumidamente pela fórmula (1).



Os materiais durante o processo de compostagem, também denominados “massa de compostagem”, são dispostos em estruturas em formatos de cone ou leiras a depender da quantidade de resíduo gerada (PEREIRA NETO, 2014).

Técnicas mais simples são comuns em cidades de menor porte, pequenas comunidades ou até mesmo realizadas em nível doméstico, contudo quando se trata de

grandes quantidades de resíduos é necessária uma organização operacional com tecnologias apropriadas para garantir um produto com a qualidade esperada (BARROS, 2012).

3.2.2 Benefícios

Diversos impactos ambientais podem ser mitigados quando uma região passa a desenvolver o processo de compostagem com operação e controle corretos. Há uma redução na geração de lixiviado, preservando a qualidade das águas subterrâneas, e metano, gás com alto potencial de aumentar o efeito estufa formado quando a decomposição da matéria orgânica ocorre em ambiente anaeróbio (RISSE; FAUCETTE, 2009).

Massukado (2008) cita que a vida útil de um aterro sanitário é aumentada quando uma parcela da fração orgânica deixa de ser depositada no mesmo através de uma forma alternativa de tratamento. A autora complementa que podem ser reduzidos gastos com disposição final, tratamento do chorume e transporte (caso a área de compostagem esteja localizada mais próxima da fonte geradora).

A compostagem permite a redução do volume de resíduos, com métodos operacionais relativamente simples, transformando um potencial problema em um recurso valioso com atrativas características físicas, químicas e biológicas para o solo (BREWER *et al.*, 2013). Para Inácio e Miller (2009) a perda de vapor d'água (umidade) e de carbono na forma de dióxido de carbono causam uma redução em cerca de 40 a 80% do peso total e de 25 a 50% do volume inicial.

Uma vasta gama de resíduos orgânicos podem ser usados na compostagem tornando o processo flexível para ser implementado para diferentes fontes geradoras. Em áreas urbanas a compostagem pode ser realizada com variadas matérias primas, como resíduos domiciliares, resíduos verdes (manutenção de parques e podas da arborização urbana), resíduos alimentares de indústrias e comércio e lodo gerado no tratamento de esgoto (CESTONARO, 2018).

Barros (2012) recomenda a compostagem por dois principais motivos: minimiza a quantidade de resíduos orgânicos, que são estimados em mais da metade dos resíduos domiciliares brasileiros, que deveriam ser dispostos adequadamente para mitigar os impactos ambientais; por outro lado, fornece nutrientes e outros elementos que favorecem o desenvolvimento da vegetação local.

Risse e Faucette (2012) relatam que o uso do composto orgânico tem o poder de regenerar solos considerados pobres, aumentando a capacidade de troca catiônica, infiltração de água em solos argilosos e capacidade de retenção de água em solos com maior granulometria. Além disso, ocorre uma redução de doenças nas plantas e parasitas por causa da multiplicação de microrganismos, minhocas e insetos benéficos.

Embora os agrotóxicos auxiliem no controle de pragas e doenças, podem trazer consequências maléficas ao solo, recursos hídricos e intoxicação no ser humano. Nessa conjuntura é pertinente utilizar um material que não agrida o meio ambiente. O composto orgânico tem uma quantidade menor de nutrientes quando comparado aos fertilizantes químicos, porém é considerado uma fonte de nutrientes em longo prazo (MASSUKADO, 2008).

Contudo a compostagem apresenta algumas desvantagens como possível atração de animais indesejados e geração de maus odores, somadas ao fato de que caso não seja uma metodologia de operação realizada da forma correta o produto passa a ser um material de baixa qualidade sem aceitação no mercado e falta de apoio da comunidade local. A má concepção de alguns projetos de reciclagem e compostagem no Brasil acabam comprometendo a credibilidade destas técnicas, que são bastante indicadas (BARROS, 2012).

Quando comparadas com outras formas de tratamento de resíduos as instalações de compostagem demandam maiores áreas, que podem ser reduzidas caso haja agilidade na comercialização dos produtos e assim uma menor necessidade de local para armazenamento (FONSECA, 2012). Barros (2012) apresenta os lados positivos e negativos da compostagem no Quadro 1.

Quadro 1 - Pontos positivos e negativos da compostagem

Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Representa uma prática de reciclagem, cujos princípios podem ser estendidos a outras atividades socioeconômico-culturais; • Possibilita a recuperação e reutilização de matéria-prima (reciclagem dos resíduos de natureza orgânica), diminuindo a quantidade de resíduos a serem aterrados e o volume de chorume e metano produzidos nos aterros; • Propicia a recuperação de solos exauridos; • Permite uma significativa economia de energia, quando comparada aos tratamentos possíveis; • Os rejeitos do processo podem ser dispostos sem problemas em aterros sanitários; • A usina de compostagem idealmente não polui nem contamina a vizinhança; • Não necessita de mão de obra muito especializada; • Representa oportunidade de geração de emprego e renda; • Pode diminuir a necessidade de transporte de resíduos.
Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • É um método de tratamento parcial (somente matéria orgânica), com alguma flexibilidade para absorver grandes variações na produção de resíduos sólidos; • Exige controle operacional eficaz, para que não sujam problemas na manutenção do composto, e portanto com sua qualidade; • Necessita de triagem eficiente de materiais indesejáveis, evitando contaminação do composto; • Pode haver flutuação sensível no mercado consumidor do composto.

Fonte:Barros (2012).

3.2.3 Etapas da Compostagem

Após a formação da pilha de resíduos a temperatura está próxima aos valores encontrados no meio ambiente. Logo em seguida as fontes de carbono facilmente biodegradáveis, como amido e monossacarídeos, são utilizadas pelos microrganismos, diminuindo o pH da mistura com a formação de ácidos orgânicos (FONSECA, 2012). Posteriormente, continua o autor, as proteínas passam a ser consumidas pelos microrganismos, liberando amônio e elevando o pH. Por fim, os compostos mais resistentes (celulose e hemicelulose) são parcialmente degradados em húmus em um processo conhecido como maturação.

De acordo com Kiehl (1985), a compostagem pode ser dividida em três etapas distintas. A primeira é conhecida como fase fitotóxica, pois nela a massa contém quantidades

significativas de ácidos orgânicos, que são toxinas maléficas às plantas. Nesse momento são desprendidos da pilha calor, dióxido de carbono e vapor d'água.

A segunda fase é denominada bioestabilização ou semicura, onde o substrato não possui mais toxinas, mas ainda não apresenta propriedades ideais para uso no solo. A fase final é a maturação, em que o composto orgânico detém características físicas, químicas e biológicas desejáveis (KIEHL, 1985). Na fase de maturação a temperatura do processo deve estar dentro da faixa mesofílica com valores abaixo de 45 °C (PEREIRA NETO, 2014).

Já Barros (2012) simplifica o desenvolvimento da compostagem em etapa de digestão, fase em que o material orgânico chega a bioestabilização, e fase de humificação que é a transformação da matéria em um rico produto denominado húmus. Segundo o autor a primeira etapa dura em torno de 1 a 3 meses e a segunda fase um período de 1 a 2 meses, porém o tempo varia de acordo com os tipos de dispositivos e insumos utilizados. Pereira Neto (2014) informa que o tempo de duração da compostagem varia principalmente com a facilidade de decomposição dos resíduos orgânicos e exemplifica que materiais mais palhosos apresentam maior resistência à decomposição que materiais úmidos, como legumes e esterco.

No decorrer do processo já não é mais possível identificar o material original de formação das pilhas. Ao final, o composto orgânico se encontra estabilizado, homogêneo, com coloração escura, rico em substâncias húmicas e com cheiro agradável de terra (INÁCIO; MILLER, 2009).

3.3 Fatores que influenciam a compostagem

Como compostagem é um processo biológico, alguns aspectos devem ser levados em conta para o melhor desenvolvimento dos microrganismos. A decomposição, maturação e qualidade do produto final do processo de compostagem são influenciadas por alguns fatores, entre eles: umidade, temperatura, relação C/N e os resíduos orgânicos utilizados (BARREIRA; PHILIPPI JUNIOR; RODRIGUES, 2006).

Segundo Cordeiro (2010), o controle e melhoria dos aspectos operacionais relacionados a tais fatores devem ser observados desde a montagem das leiras e tem como objetivo fornecer as condições adequadas para que os microrganismos possam se desenvolver. Massukado (2008) acrescenta que o metabolismo dos microrganismos envolvidos no processo é extremamente sensível às variações desses fatores que interferem no processo, e assim, a compostagem só apresenta vantagens quando o controle operacional é bem realizado.

3.3.1 Temperatura


Para Antônio e Damião (2011), temperatura é o parâmetro mais importante de controle do processo de compostagem por indicar a velocidade em que as reações metabólicas dos microrganismos estão ocorrendo. A compostagem é um processo aeróbio, e assim, há uma multiplicação natural dos microrganismos e rápido aquecimento da massa, pois o metabolismo desses seres é exotérmico (KIEHL, 1985).

Os organismos possuem uma faixa ideal de temperatura para se desenvolverem e variações na temperatura das leiras podem ocasionar uma redução da atividade microbiana. Quando as leiras são formadas respeitando os critérios técnicos, temperaturas na faixa termofílica (acima de 40°C) devem ser observadas no período de 12 a 24 horas após a montagem (PEREIRA NETO, 2014). Segundo o autor, esses valores devem permanecer durante toda a fase de degradação ativa até que o processo passe para a fase de maturação, quando são encontrados valores abaixo de 40°C.

Massukado (2008) relata que a manutenção da temperatura até 65°C contribui para a eliminação de possíveis organismos patogênicos e ervas daninhas presentes nas leiras. Contudo, temperaturas acima de 70°C são desaconselháveis por longos períodos, pelo fato de que o excesso de calor restringe o número de microrganismos e, conseqüentemente, reduz a atividade biológica (KIEHL, 1985). A Resolução nº 481 do CONAMA determina as temperaturas necessárias de acordo com o tempo para a higienização dos resíduos orgânicos durante o processo de compostagem (Quadro 2).

Quadro 2 - Temperatura necessária para higienização da compostagem

Sistema de Compostagem	Temperatura (°C)	Tempo (dias)
Sistemas abertos	>55°C	14
	>65°C	3
Sistemas fechados	>60°C	3



Fonte: Brasil (2017).

O controle da faixa aconselhável de temperatura pode ser feito por meio de revolvimento e irrigação das leiras. Em leiras com operação sem revolvimento (leiras estáticas) é utilizada aeração forçada com o intuito de fornecer oxigênio e diminuir a temperatura. Andreoli (2001) comenta que a demanda de ar introduzido nas leiras estáticas com o intuito de reduzir a temperatura pode ser de 5 a 10 vezes maior que o preciso para a respiração microbiana.

O desenvolvimento da temperatura depende de outros fatores que influenciam a compostagem: materiais com grandes quantidades de proteínas possuem baixas relações C/N e são aquecidos mais rapidamente; materiais mais grosseiros facilitam a aeração no interior das leiras, porém perdem calor mais facilmente que materiais de menor granulometria; a manutenção da umidade em níveis desejados acelera o aquecimento das leiras (ANTÔNIO; DAMIÃO, 2011).

3.3.2 Umidade

Por ser um processo biológico, a compostagem necessita de água para que os microrganismos possam realizar suas atividades metabólicas (PEREIRA; GONÇALVES, 2011). A água é o único meio utilizado tanto para a eliminação dos materiais residuais digeridos como para solubilização do substrato (PEREIRA NETO; LELIS, 1999).

A quantidade de água presente na pilha de compostagem varia durante o processo por dois motivos. O primeiro devido ao fato que os microrganismos aeróbios produzem água em suas reações metabólicas contribuindo para o aumento da umidade, enquanto que ocorrem perdas de água na forma de vapor por causa do aumento da temperatura (CORDEIRO, 2010).

De acordo com Kiehl (1985), na compostagem a matéria orgânica poderia se decompor em um ambiente totalmente saturado caso o oxigênio não fosse um fator essencial, contudo devido a necessária presença de água e ar ao mesmo tempo nos espaços vazios, a umidade deve estar dentro de limites estabelecidos para que os dois fatores sejam atendidos. O autor complementa que os limites adequados para o desenvolvimento da biota estão entre 40% e 60% de umidade e o valor considerado ótimo em torno de 50%.

Estudos relatam que as reações dos microrganismos ficam praticamente inibidas com teores de umidade abaixo de 40% mesmo que em teoria exista algum tipo de atividade microbiológica com valores de até 15% (INÁCIO; MILLER, 2009).

Compostagem se mostra uma alternativa interessante no tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares já que estes possuem umidade na faixa de 55% (MASSUKADO, 2008).

Pereira Neto e Lelis (1999) comentam que o controle da umidade é um fator de grande importância, pois afeta a eficácia da compostagem e os aspectos higiênicos da usina. Segundo os autores, a falta de controle é capaz de provocar atração de vetores, emissão de odores fétidos, geração de chorume e reações anaeróbias com possível paralização da decomposição.

Caso a umidade esteja acima da faixa recomendada, a temperatura não se eleva até valores ideais para a eliminação de organismos patogênicos devido à falta de oxigênio (BREWER *et al.*, 2013). Por outro lado, a queda do teor de umidade leva a uma diminuição da temperatura e uma falsa interpretação que o processo foi finalizado, produzindo um composto orgânico de baixa qualidade (PEREIRA NETO; LELIS, 1999).

A capacidade de retenção de água é inversamente proporcional ao tamanho das partículas dos materiais, portanto resíduos mais grosseiros podem iniciar o processo com porcentagem de umidade um pouco acima do limite estipulado de 60% (KIEHL, 1985). Essa informação auxilia na escolha dos materiais mais adequados que estão disponíveis na região do tratamento. Leiras com menores alturas possuem a tendência de perder mais água, principalmente pela ação dos ventos.

Massukado (2008) informa que para controlar o excesso de umidade as leiras devem ser revolvidas ou podem ser adicionados materiais secos com o intuito de equilibrar a porcentagem de água na mistura. Quando a situação é inversa, as leiras necessitam ser irrigadas no momento do revolvimento para que a água seja homoganeamente distribuída.

3.3.3 Aeração e revolvimento

A decomposição dos resíduos pode ocorrer em um ambiente aeróbio ou anaeróbio. Um sistema com boa aeração é importante, pois os microrganismos necessitam de oxigênio para que a oxidação da matéria orgânica seja aeróbia, mais rápida e eficiente que a decomposição anaeróbia (KIEHL, 1985). O autor complementa que a quantidade de oxigênio

presente na pilha deve ser superior a 10% e preferivelmente, acima de 17%. Segundo Inácio e Miller (2009), devido à intensa atividade microbiana, concentrações com menos de 10% de oxigênio podem ser encontradas principalmente na região central das leiras, concluindo que, por esse motivo, na prática a compostagem é um processo predominantemente, mas não totalmente aeróbio.

O volume de dióxido de carbono aumenta enquanto que a quantidade de oxigênio disponível é reduzida na medida em que os microrganismos vão decompondo a matéria orgânica. Para Oliveira (2010), a demanda de oxigênio na fase de maturação é reduzida devido à redução da atividade biológica.

De acordo com Kiehl (1985), o consumo de oxigênio depende principalmente, da umidade, da temperatura, da composição química e granulometria dos materiais a serem compostados e frequência dos revolvimentos. É indicada a trituração de materiais grosseiros com elevada relação C/N com o intuito de reduzir o tamanho das partículas e acelerar o processo, contudo não é recomendado para restos de alimentos, pois esses são materiais de rápida decomposição (INÁCIO; MILLER, 2009).

O fluxo de oxigênio afeta a atividade microbiana, a taxa de degradação do material e a variação da temperatura, entretanto o excesso de arejamento pode evitar que a temperatura chegue a níveis termofílicos ótimos para a decomposição (FREITAS, 2016).

Fernandes (1999) cita as principais funções do revolvimento: fornecer a quantidade necessária de oxigênio para os microrganismos aeróbios, remover o excesso de calor na pilha, reduzir a umidade com remoção da água na forma de vapor e remover os gases gerados no processo (CO₂, NH₃, etc.) do interior da massa. Maragno, Trombin e Viana (2007) fortalecem a importância do revolvimento, pois os teores de gás carbônico encontrado no interior das pilhas de compostagem podem chegar a concentrações cem vezes maiores que no ar atmosférico.

O revolvimento pode ser manual ou mecânico dependendo das características dos resíduos e tecnologia disponível no tratamento. Revolvimentos manuais são indicados em situações que a massa de resíduos diários seja de até 500 kg e não haja mão de obra especializada, já quando as leiras são de maiores portes e há disponibilidade de mão de obra para operar os equipamentos são indicados revolvimentos mecânicos (MASSUKADO, 2008). O fornecimento de oxigênio também pode ser realizado por insuflação de ar através de sopradores.

3.3.4 Relação carbono/nitrogênio (C/N)

Nitrogênio e carbono são elementos fundamentais para o desenvolvimento da biota existente no substrato orgânico. O primeiro, pelo papel essencial na síntese protéica celular, e o segundo, por ser fonte energética dos microrganismos (MASSUKADO, 2008). O equilíbrio da relação C/N é importante pelo motivo que o maior objetivo da compostagem é fornecer condições adequadas para que os microrganismos possam fixar os nutrientes (MARAGNO; TROMBIN; VIANA, 2007).

Os microrganismos que participam da compostagem absorvem os nutrientes carbono e nitrogênio na proporção de trinta partes para um, respectivamente, e eliminam dois terços do carbono na forma de dióxido de carbono, mantendo um terço do carbono no seu protoplasma celular que possui uma relação C/N igual a 10/1 (KIEHL, 1985). Esta é a razão que diversos pesquisadores recomendam uma relação inicial de 30/1.

A análise da relação C/N é comumente usada como indicador da estabilidade biológica e até mesmo como padrão de qualidade do composto orgânico (REIS, 2005). Segundo ainda a autora, quando há uma redução no valor da relação em torno de 35/1 para 18/1 - 20/1, quer dizer que houve um adiantamento no grau de maturação. Para Kiehl (1985), a mineralização do nitrogênio é iniciada quando a relação cai para valores abaixo de 17/1.

Para Brewer *et al.* (2013), iniciar a compostagem com a relação adequada entre carbono e nitrogênio é necessário para um processo eficiente e o produção de um composto com qualidade. Segundo Barros (2012), a faixa de variação da relação C/N ideal está entre 30/1 e 40/1. De acordo com Russo (2003), não existe um valor absoluto ideal para a relação entre carbono e nitrogênio e cita os valores ótimos de acordo com diferentes autores (Quadro 3).

Quadro 3 - Relações de C/N ótimas para a compostagem

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

Fonte: Adaptado de Russo(2003).

Segundo Valente *et al.* (2009), a relação C/N inicial da mistura do substrato interfere no tempo de estabilização e maturação dos resíduos orgânicos. Para Reis (2005), usualmente é utilizado na mistura um volume de três partes de materiais ricos em carbono e uma parte de material rico em nitrogênio. De acordo com Maragno, Trombin e Viana (2007) são fontes de carbono os resíduos palhosos, já os resíduos frescos e fecais são fontes de nitrogênio.

Conforme Guermandi (2015), quando um composto com alta relação C/N é aplicado ao solo, os microrganismos retiram o nitrogênio disponível no solo na forma nítrica ou amoniacal para equilibrar a relação entre os nutrientes, gerando assim uma deficiência de nitrogênio nas plantas. Além dessa questão, em caso de falta de nitrogênio no substrato, grande parte do carbono não é digerido, e a pilha não aquece da maneira correta, retardando o desenvolvimento da compostagem (BREWER *et al.*, 2013).

Quando são utilizados na formação das leiras resíduos com alta relação C/N é possível que no fim do processo os valores não estejam dentro dos parâmetros adequados para ser usado no solo. Inácio e Miller (2009) recomendam o peneiramento do material resultante para obter a parcela mais fina humificada e com menor relação entre os nutrientes.

Se o material possuir uma baixa relação C/N o carbono será utilizado e o nitrogênio estará em excesso, podendo ser perdido da pilha de compostagem na forma de amônia gerando odores desagradáveis, além de reduzir o teor desse elemento no produto acabado (REIS, 2005). O desprendimento da amônia é acentuado na fase termófila e em pH alcalino (KIEHL, 1985).

Quando parte do carbono é de difícil degradação, como celulose, lignina e hemicelulose a decomposição acontece de forma mais lenta e é indicado utilizar uma relação C/N inicial mais alta, pois o carbono biodisponível é inferior ao carbono total (VALENTE, 2009).

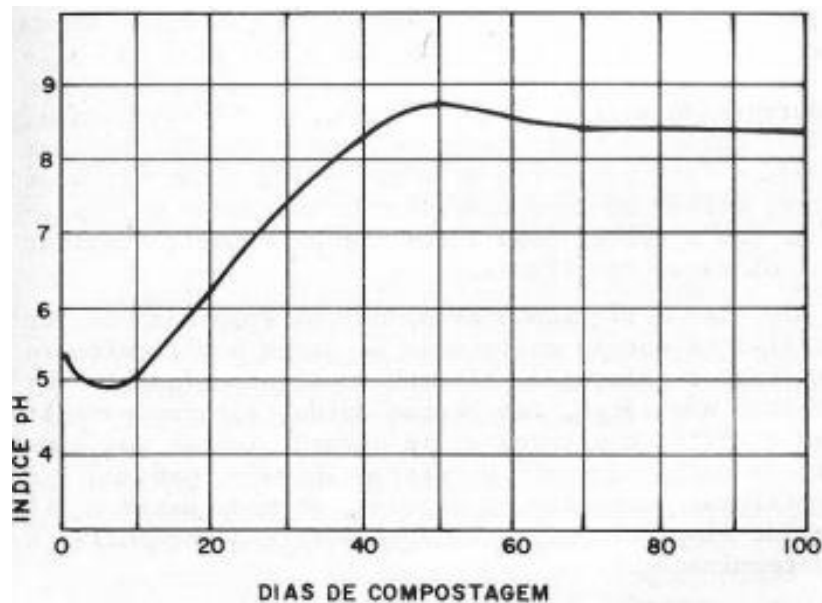
3.3.5 pH

Valores de pH muito baixos ou muito altos reduzem a atividade microbiana. Segundo Russo (2003), materiais orgânicos com pH entre 3 e 11 podem ser usados na compostagem, mas os microrganismos se adaptam preferencialmente à resíduos próximos a neutralidade com variação entre 5,5 e 8.

Russo (2003) comenta que é difícil controlar os valores de pH no decorrer do processo de compostagem. Contudo esse fator é automaticamente regulável pelos microrganismos que produzem subprodutos ácidos ou básicos de acordo com as características do meio (PEREIRA NETO, 2014).

Após o início do processo de compostagem, ocorre uma fase denominada fitotóxica, com formação de ácidos orgânicos diminuição do pH da massa, contudo posteriormente os ácidos reagem com as bases liberadas da matéria orgânica, gerando compostos de reação alcalina (MARAGNO; TROMBIN; VIANA, 2007). A Figura 2 retrata os valores de pH comumente encontrados durante a compostagem.

Figura 2- Valores de pH durante a compostagem



Fonte: Kiehl (1985).

Fonseca (2012) observa que o fator potencial hidrogeniônico passa a ter maior importância em relação às perdas de nitrogênio, já que ocorre maior volatilização da amônia quando o valor de pH supera 7,5 e em altas temperaturas. Assim, não é indicado adicionar calcário ou cinzas à massa de compostagem no início da compostagem, pois o meio ficaria alcalino e haveria volatilização da amônia (KIEHL, 1985).

3.3.6 *Microrganismos*

As características físicas e químicas da matéria orgânica são completamente alteradas devido à intensa atividade microbiológica. Tais microrganismos apresentam algumas peculiaridades permitindo que sejam específicos na decomposição de alguns tipos de materiais em diferentes etapas do processo (PEREIRA NETO, 2014).

Inácio e Miller (2009) dividem a matéria orgânica da compostagem em grandes grupos: carboidratos, açúcares, proteínas e gorduras, que são substâncias com biodegradabilidade mais simples, e; hemicelulose, celulose e lignina que apresentam uma decomposição mais lenta. Segundo os autores as substâncias mais simples são fontes primárias de carbono e energia com grande importância do início a fase termofílica, enquanto que os grupos mais complexos, apesar de não serem fontes de pronta disponibilidade, são os principais fornecedores de carbono e energia ao longo de todo o processo.

Bactérias, fungos e actinomicetos são os principais organismos que participam da transformação da matéria orgânica em um composto; ocorre durante o processo uma alternância da predominância desses microrganismos, o que depende de alguns fatores, como relação C/N, pH, umidade, temperatura, disponibilidade de oxigênio e natureza do material que está sendo decomposta no momento (KIEHL, 1985).

As bactérias constituem o grupo mais participante da fase inicial e termofílica da compostagem, já que esses microrganismos consomem açúcares, amidos, proteínas e outros compostos de fácil decomposição biológica (MASSUKADO, 2008). Os actinomicetos e fungos são fundamentais na decomposição de compostos orgânicos mais complexos (INÁCIO; MILLER, 2009).

De acordo com Kiehl (1985), os resíduos orgânicos já possuem naturalmente uma quantidade de organismos que se multiplicam rapidamente. Para Inácio e Miller (2009) compostos orgânicos prontos ou não, podem ser utilizados como material inoculante com o objetivo de acelerar a fase inicial do processo.

3.4 Métodos de compostagem

A compostagem é uma técnica adaptável que pode ser empregada para pequena, média ou grande escala. Massukado (2008) cita que o processo pode utilizar soluções mais simples como em domicílios e pequenas comunidades, e metodologias mais complexas em fazendas, indústrias e em nível municipal que necessitam de dispositivos tecnológicos adequados e mão de obra especializada.

As condições relacionadas à acessibilidade de espaço, infraestrutura, custos com disposição dos resíduos, nível de controle de odor necessário, disponibilidade técnica e financeira são fatores que devem ser levados em conta na decisão de qual método a ser implementado. Sistemas com alto grau tecnológico geralmente requerem maiores investimentos, contudo melhoram a qualidade do produto e aceleram o processo de compostagem com altas taxas de degradação da matéria orgânica, e assim, necessitam de menores áreas (REIS, 2005).

Os métodos de compostagem são divididos em grupos em função principalmente do tipo de aeração empregada, grau de revolvimento e se o processo ocorre em ambiente fechado ou com formação de leiras em pátio. Inácio e Miller (2009) classificam os

métodos em leiras estáticas com aeração passiva, leiras estáticas com aeração forçada, compostagem com revolvimentos de leiras e compostagem em reatores.

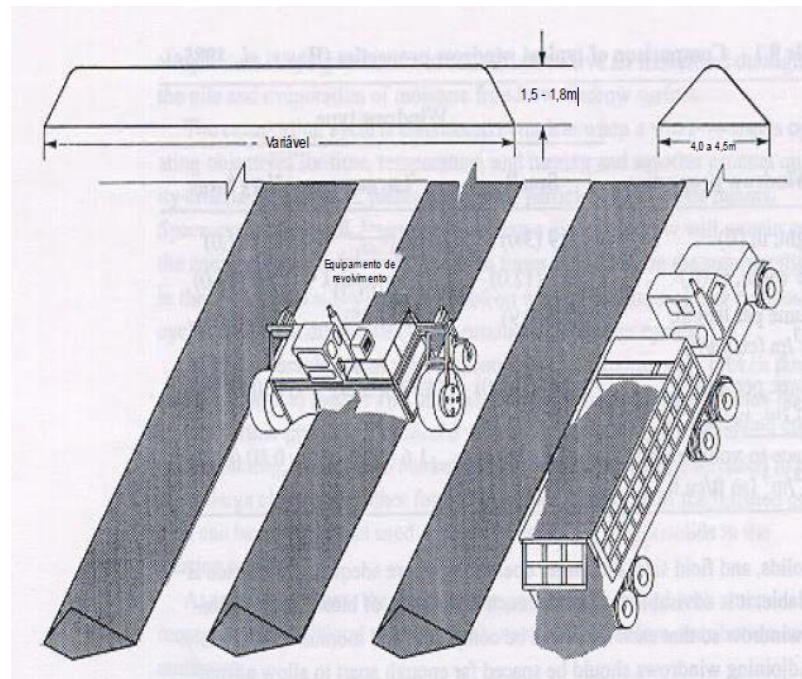
Não existe um método considerado melhor, pois cada situação se adequa a uma preferível maneira de formação e operação. Segundo Inácio e Miller (2009), pelos riscos de gerar maus odores e atração de moscas, os revolvimentos são mais indicados para compostagem com resíduos vegetais que possuem uma degradação mais lenta e em locais com baixa concentração de residências. Os autores complementam que quando é necessário um maior controle com odores desagradáveis, principalmente com restos de comidas ou lodos, são mais adequados sistemas estáticos ou em reatores fechados.

Para Zurbrügget *al.*(2002) o uso de uma tecnologia de compostagem apropriada em conjunto com uma gestão financeira bem realizada e um plano de *marketing* resulta na produção de um composto orgânico de alta qualidade com possibilidade de vendas durante o ano todo.

3.4.1 Leiras revolvidas

Nesse método as leiras podem ser revolvidas de forma manual ou com auxílio de máquinas, a depender da composição e quantidade de resíduos recebidos diariamente. Os equipamentos geralmente são retroescavadeiras, máquinas tracionadas por trator, ou até mesmo máquinas fabricadas especificamente para revolvimento que se deslocam sobre as leiras (Figura 3).

Figura3 - Sistema de leiras revolvidas



Fonte: Fernandes e Silva (1999).

É o método mais utilizado no Brasil devido ao baixo custo de implantação e simplicidade de operação, contudo essa forma de manejo acarreta em maiores custos operacionais devido a maior necessidade de mão de obra (INÁCIO E MILLER, 2009).

As leiras devem ser formadas com dimensões que facilitem o transporte e manobras das máquinas no interior do pátio, sendo geralmente concebidas com larguras de 4,0 a 4,5 m, altura de 1,5 a 1,8m e espaçamento de 3,0 m entre as mesmas (FERNANDES; SILVA, 1999).

O sistema com revolvimento das leiras pode gerar problemas com maus odores principalmente no início do processo (REIS, 2005). Portanto, continua o autor, é indicado para regiões com baixa densidade populacional e com uso de cortinas vegetais para minimização da emissão de odores.

Com esse método, a fase de bioestabilização, que dura entre 1 e 2 meses, as leiras devem ser revolvidas duas vezes por semana, enquanto que na fase de maturação que pode levar 2 a 3 meses para ser completada as leiras devem ser revolvidas a cada 25 dias (FERNANDES; SILVA, 1999).

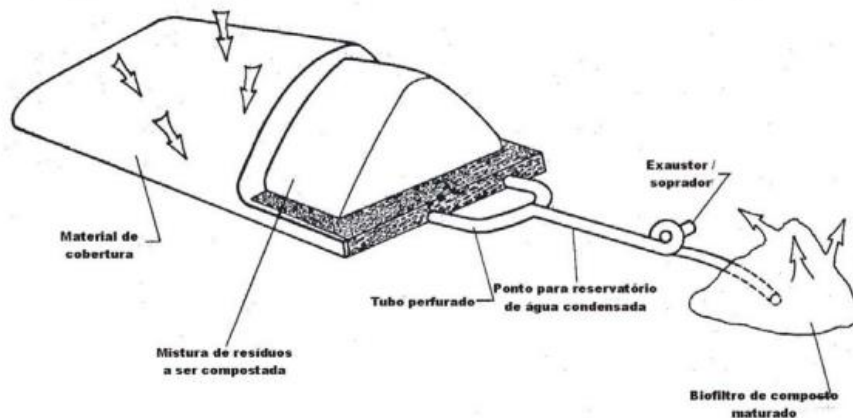
3.4.2 Leiras estáticas com aeração forçada

A não necessidade de revolvimento para o fornecimento de oxigênio é a principal vantagem desse método. Como não devem ser destinados espaços para o revolvimento com máquinas e a possibilidade de formação de leiras mais largas, há uma redução pela demanda de área.

O Brasil possui poucas plantas de compostagem que utilizam aeração forçada, ao contrário dos Estados Unidos que têm substituído os revolvimentos mecânicos por essa metodologia (INÁCIO, MILLER, 2009).

Na compostagem com aeração forçada são usados sopradores ou exaustores que possuem a função de insuflar ou aspirar o ar no interior das leiras. Tubos perfurados são conectados à esses equipamentos em uma camada de material estruturante, como madeira e galhos triturados, cerca de 15 a 20cm abaixo das leiras para facilitar o fluxo de ar. De acordo com Reis (2005), deve ser colocada uma fina camada de composto peneirado e maturado com as funções de reter o calor no interior da pilha e filtragem de gases, minimizando possíveis odores. Inácio e Miller (2009) complementam que sistemas de automação podem ser inseridos pois acionam a aeração de acordo com a temperatura no interior das leiras. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático da compostagem com aeração forçada.

Figura 4 - Sistema de compostagem com leira estática aerada



Fonte: Fernandes e Silva (1999).

O sistema com aeração forçada é recomendado para resíduos com composição e granulometria homogêneas, para garantir um adequado fluxo do ar insuflado (MASSUKADO, 2008). Caso esse fator não seja observado, pode ocorrer uma distribuição desigual do fornecimento de oxigênio e até mesmo a interrupção do processo de compostagem (INÁCIO; MILLER, 2009). Segundo Fernandes e Silva (1999), o dimensionamento do sistema de aeração tem como objetivos: satisfazer a demanda de oxigênio do processo aeróbio; remover os excessos de umidade e de calor, mantendo a temperatura em torno de 60°C.

3.4.3 Reatores fechados

A compostagem realizada em reatores fechados, também conhecida como *In-vessel*, permite um controle dos principais fatores que interferem no processo como temperatura, umidade e disponibilidade de oxigênio. É esperado que esse método seja mais eficiente em relação a homogeneização, equilibrando a temperatura e aumentando a garantia da eliminação de organismos patogênicos (REIS, 2005).

De acordo com Inácio e Miller (2009), essa forma de tratamento é também conhecida como método de compostagem acelerada, pois a fase termofílica é reduzida a um

prazo entre 1 e 4 semanas, o que minimiza a necessidade de área para o projeto, embora a maturação do composto possa levar até 60 dias.

Fernandes e Silva (1999) enquadram a compostagem em reatores em três categorias:

- a) Reatores de fluxo vertical: São sistemas semelhantes com silos em que o material entra pela parte superior e atravessa o reator até a região inferior onde a fase termofílica é finalizada e o composto é transportado para o pátio de maturação. O fornecimento de oxigênio pode ocorrer em vários níveis ou apenas na base do reator;
- b) Reatores de fluxo horizontal: São conhecidos como túneis por apresentarem forma cilíndrica e disposição horizontal. O ar é injetado por pressão ao longo do trajeto;
- c) Reator de batelada: O reator apresenta um sistema de agitação interno ou a agitação ocorre com a rotação em torno do próprio eixo. Diferem dos reatores de fluxo vertical e fluxo horizontal pelo fato do material ficar confinado no mesmo local.

3.4.4 Leiras estáticas com aeração passiva

Leiras estáticas possuem essa denominação por não serem revolvidas frequentemente. Quando há revolvimento das leiras nesse método, este ocorre normalmente durante a transição da fase termofílica para a etapa de maturação. O fornecimento do oxigênio ocorre com a passagem do vento pela massa de compostagem com ou sem o auxílio de estruturas de madeira (Figura 5) ou tubulações (TEIXEIRA *et al.*, 2004).

Figura 5 - Leira estática com túnel de ventilação



Fonte: Teixeira *et al.* (2004)

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) desenvolveu uma metodologia denominada “método UFSC”, a qual não utiliza estruturas ou equipamentos que auxiliam o fluxo de ar, mas se atentam na arquitetura de formação das leiras com paredes retas (ou próximas disso) sustentadas por gramas ou restos de vegetais (INÁCIO; MILLER, 2009). Esses materiais de apoio da leira e sua forma arquitetônica facilitam a convecção do ar e a entrada de oxigênio.

Buttenbender (2004) cita que a compostagem em leiras estáticas com aeração passiva busca economizar recursos financeiros com a redução da frequência dos revolvimentos, além de diminuir a atração de vetores e produção de maus odores que geralmente causam incômodos nos revolvimentos tradicionais. O autor testou a viabilidade do referido método para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos do município de Angelina/SC e teve a seguinte conclusão:

Do ponto de vista operacional, o sistema de compostagem termofílica em leiras estáticas caracterizou-se como um processo flexível, de baixo custo, que utiliza equipamentos simples, sanitariamente adequado, e principalmente por requerer mão-de-obra reduzida, eliminando os revolvimentos periódicos da massa de lixo. [...] A configuração da leira associada ao sistema de aeração, permitiram a permanência de temperaturas termofílicas durante o período de aproximadamente 120 dias. O elevado período de exposição dos agentes patogênicos a altas temperaturas gerou um composto orgânico isento de coliformes fecais [...] Ficou constatado ainda, o controle dos principais aspectos ambientais causados (vetores, odores e percolados) (BUTTENBENDER, 2004).

O método de compostagem em leiras estáticas com aeração passiva se mostra uma alternativa interessante para o Brasil devido a grande disponibilidade de área e mão-de-obra para uma metodologia mais simples, além da não necessidade de grandes investimentos (INÁCIO; MILLER, 2009).

3.5 Maturação e qualidade do composto

Para que o processo de compostagem perdure ao longo do tempo em uma determinada região é necessário que o objetivo não seja apenas o tratamento dos resíduos orgânicos. A qualidade do composto orgânico produzido deve ser satisfatória para o uso contínuo dos agricultores. Caso as características do produto não sejam ideais para disposição no solo, haverá pouca aceitação do mercado e conseqüentemente estoques de composto orgânico serão armazenados na usina de compostagem.

De acordo com Cordeiro (2010), para que a compostagem seja bem sucedida, a qualidade final do produto jamais poderá ser esquecida. A autora complementa que um composto final ideal depende de quais resíduos orgânicos foram utilizados no início do processo. Por exemplo, se a massa da mistura de uma leira apresentar metais pesados em sua composição, esses elementos não serão eliminados no tratamento. A qualidade do composto depende do grau de estabilidade biológica, maturação e evolução da matéria orgânica dos resíduos (SANTOS, 2007).

Existe uma diferença no conceito de composto estabilizado e maturado. O composto é considerado estabilizado no final da fase de degradação ativa, quando os microrganismos degradaram a maior parte dos componentes biodegradáveis. Quando a matéria orgânica é transformada em substâncias húmicas o composto é tido como maturado. Kiehl (2004) relaciona no Quadro 4 o uso do composto no solo de acordo com a fase de decomposição

Quadro 4 - Classificação do composto em função do uso agrícola

Matéria orgânica crua	Matéria prima que pode ser transformada em composto. Material cru que ainda não entrou em decomposição. Ainda não é composto.	Não recomendável para uso direto na agricultura.
Composto Imaturo	Matéria orgânica em decomposição parcial. Ainda possui alta relação C/N.	Pode ser aplicado em culturas perenes, em cova de plantas arbóreas. Quando colocado no solo é recomendado aguardar um tempo para depois semear.
Composto semicurado ou bioestabilizado	Composto com relação C/N igual ou menor que 18:1, pH acima de 6 e que permaneceu por um bom período na fase termófila.	Pode ser aplicado no fundo do sulco de plantio juntamente com sementes ou em contato com as raízes das mudas transplantadas.
Composto maturado, humificado	Composto altamente estabilizado, tendo produzido húmus e sais minerais.	Pode ser utilizado no preparo de substratos para vasos, canteiros de sementeiras de flores e hortaliças.

Fonte: Kiehl (2004).

De acordo com Beltrame (2015), boa parte dos compostos orgânicos vendidos no país não são maturados, o que leva a uma grande descrença da compostagem por parte da população.

3.5.1 Metais pesados e microrganismos patogênicos

Segundo Massukado (2008), embora a compostagem possa trazer benefícios ao solo, a presença de metais pesados oriundos de baterias, tintas e cosméticos pode ser prejudiciais às plantas. A quantidade de metais pesados em solos que recebem compostos orgânicos provenientes de resíduos urbanos varia, entre outras questões, devido à concentração do elemento no composto, fatores relacionados ao solo e ao clima (MELO *et al.*, 2000).

De acordo com Reis (2005), o termo “metais pesados” é utilizado para determinar os elementos químicos que contaminam o meio ambiente. Os principais enquadrados nesse conceito são Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. O autor complementa que tais componentes, em solos não contaminados, são encontrados em concentrações inferiores àquelas consideradas tóxicas para os organismos.

Há uma preocupação da presença de elementos que contenham tais metais no uso agrícola pelo fato das plantas assimilarem esses componentes tóxicos que se deslocam para as regiões comestíveis dos vegetais, tornando nocivo tanto às plantas quanto aos animais que participam da cadeia alimentar (BARREIRA, 2005).

As normas que estabelecem o conteúdo máximo de metais pesados consideram apenas o efeito isolado de cada elemento, não levando em conta o sinergismo entre eles, que pode alterar biodisponibilidade, mobilidade e toxicidade dos compostos orgânicos no solo (ALVARENGA, 2006).

Outro fator a ser analisado quanto à contaminação dos compostos orgânicos é referente à presença de microrganismos patogênicos. Como foi comentado, quando as técnicas de compostagem são bem implementadas, grande parte dos microrganismos patogênicos devem ser eliminados com as altas temperaturas durante a fase de degradação ativa. Segundo Fernandes (1999), a efetiva eliminação ou não desses organismos levantam preocupações sob o ponto de vista epidemiológico do composto. O autor relaciona as temperaturas e o tempo necessários para a eliminação de microrganismos patogênicos (Quadro 5).

Quadro 5 - Condições de inativação de parasitas e microrganismos patogênicos

Microrganismo/Parasita	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
<i>Necator Americanus</i>	45	50
<i>Entamoebahistolística</i>	45	3
<i>Entamoebahistolística</i> (cistos)	55	1
<i>Micrococcuspyogenes</i>	50	10
<i>Streptococcuspyogenes</i>	54	10
<i>Taeniasaginata</i>	55	3
<i>CorynebacteriumDiphtheriæ</i>	55	50
<i>SalmonellaSp.</i>	55	60
<i>SalmonellaTyphosa</i>	60	30
<i>ShigellaSp.</i>	55	60
<i>Escherichia Coli</i>	55	60
<i>E. Coli</i> (cistos)	60	20
<i>Trichinellaspiralis</i> (larvas)	55	3
<i>Trichinellaspiralis</i> (cistos)	60	1
<i>BricellaAbortus</i>	55	30
<i>MicobacteriumTuberculosis</i>	67	20

Fonte: Fernandes (1999).

Segundo Kehres e Thelen-Jungling (2015), normas e diretrizes de qualidade dos compostos orgânicos são essenciais para sua comercialização já que o comércio e consumidores exigem uma garantia das características.

3.5.2 Fitotoxicidade e condutividade elétrica

Fitotoxicidade é um termo relacionado ao comprometimento do desenvolvimento da planta devido ao acúmulo de uma substância potencialmente nociva presente nos tecidos desta (BECKETT; DAVIS, 1977). A avaliação desse parâmetro é importante pois possibilita determinar a existência de substâncias que podem inibir a germinação de sementes, crescimento de raízes ou o desenvolvimento das plantas (TRAUTMANN; KRASNY, 1997).

De acordo com Cordeiro (2010), o nível de toxidade da massa de compostagem é mais elevado no início do processo quando subprodutos tóxicos são liberados pela intensa degradação dos materiais mais facilmente decomponíveis e tende a decrescer no final da compostagem. Além dos ácidos orgânicos, outros fatores podem originar fitotoxicidade, como metais pesados, pesticidas ou excesso de salinidade (BELO, 2011).

Para Santos (2007), os métodos químicos para avaliação de toxicidade são específicos para cada elemento ou substância, enquanto que os testes biológicos avaliam o composto de uma forma geral. Ensaio de crescimento e germinação são os mais comumente usados para medir o grau de fitotoxicidade (CORDEIRO, 2010). Belo (2011) informa que entre as principais sementes usadas no teste de germinação estão o agrião de jardim, repolho, alface, cenoura, tomate, pepino e aveia. Não existe unanimidade para qualificar a fitotoxicidade de um composto, contudo o valor do Índice de Germinação (IG) de 60% é amplamente considerado com inibição de germinação moderada, e assim segura para aplicação no solo (BELO, 2011).

Condutividade elétrica (CE) é outro parâmetro relacionado à qualidade do composto orgânico e ao grau de toxicidade deste (MASSUKADO, 2008). O valor de CE encontrado é diretamente proporcional à concentração de sais da solução.

3.5.3 Legislação

Ao longo das últimas quatro décadas foram elaboradas legislações que normatizam a utilização dos resíduos para agricultura como fertilizantes orgânicos, buscando um maior controle desses produtos.

A Lei Federal n° 6.894 de 1980, regulamentada pelo Decreto n° 4.954, por exemplo, trata da obrigação do cadastramento de pessoas físicas ou jurídicas e dos insumos utilizados para a produção e comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas. O artigo 2° do referido decreto faz as seguintes definições (BRASIL, 2004):

A – Fertilizante: substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes de plantas.

A.1 - Fertilizante orgânico: produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não denutrientes minerais.

A.1.1 - Fertilizante orgânico simples: produto natural de origem vegetal ou animal, contendo um ou mais nutrientes de plantas.

A.1.2 - Fertilizante orgânico misto: produto de natureza orgânica, resultante da mistura de dois ou mais fertilizantes orgânicos simples, contendo um ou mais nutrientes de plantas.

A.1.3 - Fertilizante orgânico composto: produto obtido por processo, físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas.

A.1.4 - Fertilizante organomineral: produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos.

Em 2006 foi publicada a Instrução Normativa nº 27 pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), alterada pela Instrução Normativa nº 07/2016, estabelecendo as concentrações máximas permitidas de agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas que podem estar presentes nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes produzidos ou comercializados. O Quadro 6 apresenta os limites máximos dos contaminantes comentados para fertilizantes orgânicos.

Quadro 6 - Limites máximos de contaminantes de acordo com IN 27/2006 do MAPA

Contaminante		Valor máximo admitido
Arsênio (mg/kg)		20,00
Cádmio (mg/kg)		3,00
Chumbo (mg/kg)		150,00
Cromo Hexavalente (mg/kg)		2,00
Mercúrio (mg/kg)		1,00
Níquel (mg/kg)		70,00
Selênio (mg/kg)		80,00
Coliformes termotolerantes - (NMP/g de MS)		1000,00
Ovos viáveis de helmintos - (nº em 4g ST)		1,00
<i>Salmonellas</i> p		Ausência em 10g de matéria seca
Materiais inertes	Vidros, plásticos, metais >2mm	0,5% na massa seca
	Pedras >5mm	5,0 % na massa seca

Fonte: Brasil (2006)

No Brasil o composto orgânico pode ser comercializado como um fertilizante orgânico, fertilizante organo-mineral, condicionador de solo e substrato para plantas sob a condição de estar dentro das exigências de cada classificação. O MAPA regula a qualidade do

composto por meio das instruções normativas INSDA n° 25/2009 (Fertilizantes orgânicos), IN SDA n° 35/2006 (Condicionadores de solo), IN n° 5/2016 (Substratos para plantas).

O Quadro 7 apresenta os parâmetros com limites máximos e mínimos que o composto orgânico deve conter de acordo com na IN SDA n° 25 do MAPA (2009). Segundo a Instrução, a classe C é relativa à “fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda de lixo domiciliar, resultando em produto de utilização segura na agricultura” (BRASIL, 2009).

Quadro 7–Exigência dos parâmetros para fertilizantes mistos e compostos

Garantia	Misto/composto				Vermicomposto
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classe A, B, C, D
Umidade (máx.)	50	50	50	70	50
N total (mín.)	0,5				
*Carbono orgânico (mín.)	15				10
*CTC	Conforme declarado				
pH (mín.)	6,0	6,0	6,5	6,0	6,0
Relação C/N (máx.)	20				14
*Relação CTC/C	Conforme declarado				
Outros nutrientes	Conforme declarado				
*(valores expressos em base seca, umidade determinada a 65°C)					

Fonte: Brasil (2009)

Recentemente foi formulada a Resolução n°481 de 2017 pelo CONAMA que estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem. Essa resolução complementa as instruções normativas que fixam as exigências de qualidade do composto orgânico para uso seguro no solo.

3.6 Práticas centralizada *versus* práticas descentralizadas de compostagem

Segundo Massukado (2008), existem numerosas pesquisas sobre compostagem relativas aos aspectos estruturais, operacionais e tecnológicos de usinas que recebem grandes

quantidades de resíduos sólidos urbanos, porém a literatura aborda poucas experiências de compostagem realizadas de forma descentralizada em pequena ou média escala. Tais estruturas que recebem uma grande quantidade de resíduos são conhecidas como Usinas de Triagem e Compostagem (UTC).

As UTC são unidades públicas ou privadas constituídas de espaços para recepção dos resíduos, triagem dos materiais com esteiras e diferentes equipamentos para separação de rejeitos, pátios de compostagem e aterros para rejeitos (BARREIRA, 2005).

Contudo, as tentativas de implementações das UTC, que foram popularizadas principalmente na década de 1990, foram mal sucedidas com relação aos aspectos técnicos e operacionais, deixando uma imagem negativa desse tipo de estrutura (SANTOS, 2007). O processo de compostagem realizado com utilização da parcela orgânica após separação nas esteiras de triagem de resíduos sólidos urbanos se mostrou com a formação de um produto final de baixa qualidade, muitas vezes rejeitado pelos agricultores (INÁCIO; MILLER, 2009).

Um grande problema das Unidades de Triagem e Compostagem é que os materiais não são segregados na fonte de geração, e assim, o composto orgânico produzido ao fim do processo de compostagem geralmente apresenta uma quantidade inadequada de metais pesados e organismos patogênicos segundo as normas brasileiras (CESTONARO, 2018). Muitas vezes a coleta das diferentes classes de resíduos sem segregação prévia dificulta tanto o tratamento dos resíduos ao ponto das usinas serem fechadas ou até mesmo seu espaço ser transformado em lixão (SIQUEIRA; ASSAD, 2015).

A implantação de sistemas de coleta seletiva aumentaria a qualidade e atratividade do composto por parte dos agricultores. A Resolução nº 481/2017 do CONAMA reforça em seu Artigo 9º que:

Os resíduos orgânicos originários dos resíduos sólidos urbanos destinados ao processo de compostagem devem, preferencialmente, ser originados de segregação na origem em, no mínimo, três frações: resíduos recicláveis, resíduos orgânicos e rejeitos (BRASIL, 2017).

Comumente em países em desenvolvimento a imagem da compostagem é infelizmente relacionada aos exemplos de fracasso com unidades superdimensionadas e centralizadas, enquanto que compostagem em menores escalas são mais bem sucedidas (ZURBRUGG *et al.*, 2002). De acordo com Pereira Neto (2014), um novo tratamento técnico

da questão dos resíduos nas comunidades sugere um planejamento integrado em sistemas descentralizados com foco nas ações de minimização e reaproveitamento.

Países principalmente asiáticos passaram a adotar um modelo de compostagem diferente das usinas de grande porte. Essa nova abordagem busca instalar diversas plantas de compostagem que possuem menores capacidades em volume de tratamento de resíduos, porém próximas às fontes geradoras.

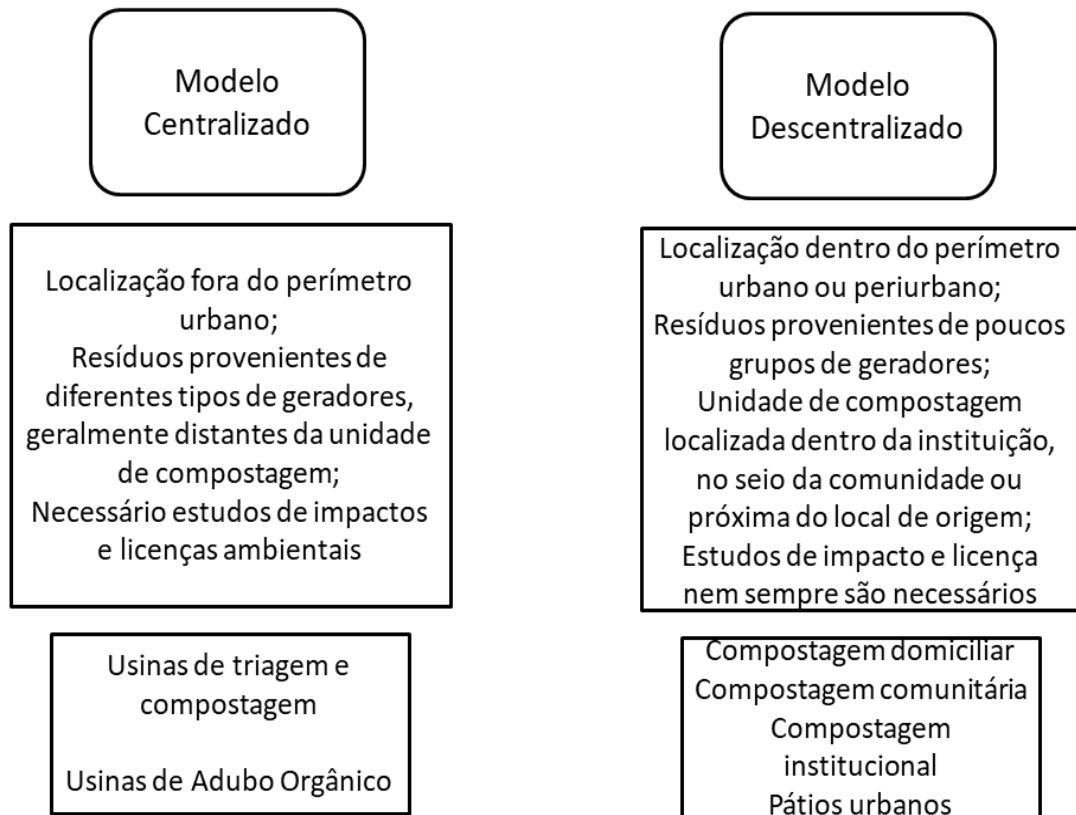
Massukado (2008) define Unidades Descentralizadas de Compostagem (UDC) como qualquer instalação física, por exemplo, áreas institucionais ou até mesmo uma indústria, com o intuito de receber e tratar os resíduos sólidos procedentes de uma coleta seletiva. O gerenciamento deve realizar o menor deslocamento possível entre a fonte geradora e o local de tratamento.

A implantação da unidade de compostagem de forma descentralizada proporciona uma redução da liberação de gases no deslocamento e custos do transporte dos resíduos ao aterro sanitário ou a uma unidade de compostagem de grande porte. A simplicidade é outra questão interessante já que uma quantidade menor de resíduos deve ser tratada diariamente.

Para Rothenberger *et al.* (2006), nas unidades descentralizadas o poder público pode conceber parcerias com iniciativas privadas para gerenciar o processo de coleta e compostagem, assim como a própria comunidade geradora dos resíduos e organizações não governamentais.

Siqueira e Assad (2015) consideram parte do modelo centralizado as Usinas de Triagem e Compostagem geralmente gerenciadas pelo poder público e Usinas de Adubo Orgânico que geralmente recebem apenas resíduos orgânicos e são operadas pelo setor privado. E consideram o modelo descentralizado constituído por compostagem domiciliar, compostagem comunitária e pátios de compostagem urbanos. Os autores apresentam as características de cada modelo na Figura 6.

Figura 6- Modelos de Compostagem



Fonte: Siqueira e Assad (2015).

3.7 Compostagem como método de redução de GEE

As cidades enfrentam desafios perante as mudanças climáticas e soluções precisam ser implantadas. Esforços estão sendo feitos no sentido de diminuir os impactos às mudanças climáticas e, dentre outras instalações, os aterros sanitários são alvos de atenção por parte de diversos setores (KONG *et al.*, 2012).

Quando os resíduos orgânicos são destinados para aterros sanitários, quantidades expressivas de metano são lançadas na atmosfera como produto secundário das reações anaeróbicas realizadas por bactérias metanogênicas (ALVES; VIEIRA, 2010). Os autores complementam que a produção de metano varia de acordo com o local, idade do aterro sanitário e composição dos resíduos.

Segundo Bezerra (2012), as estimativas da geração de gás metano em aterros sanitários no mundo são da ordem de 20 a 70 milhões de toneladas por ano, representando de

6 a 20 % das emissões globais por fontes antropogênicas. De acordo com o relatório do Programa das Nações Unidas para Desenvolvimento, 5 % das emissões de gases de efeito estufa e 12 % das emissões de metano são provenientes dos resíduos sólidos, e enfatiza que a gestão adequada desses resíduos tem potencial para grande redução dos gases de efeito estufa (UNDP, 2010).

Os dejetos de animais no meio rural são grandes fontes de poluição do meio ambiente por causa da alta porcentagem de umidade que geralmente apresentam, tornando o meio anaeróbico. Para Sardá *et al.* (2010), a compostagem permite tratar os dejetos dos animais de forma sólida, reduzindo a quantidade de água com a mistura de matérias e tornando o meio aeróbico, no qual o principal produto gerado é o CO₂. Além dos problemas citados, em meio anaeróbico ocorre a emissão de gás sulfídrico, gás incolor com odor desagradável e contribui com a formação das chuvas ácidas (BLUNDEN; ANEJA; OVERTON, 2008).

Segundo Alves e Vieira (2014), além da contribuição das emissões de gases de efeito estufa, a geração de metano carrega grande riscos à população já que em altas concentrações é capaz de provocar explosões, principalmente em lixões.

O desvio da fração orgânica dos resíduos de aterros sanitários para métodos alternativos de tratamento como compostagem e digestão anaeróbica é defendido como uma forma de minimizar as emissões de gases de efeito estufa (KONG *et al.*, 2012).

Segundo Sánchez *et al.* (2015), as emissões de CO₂ derivadas da degradação da matéria orgânica não devem ser consideradas contribuintes para a intensificação do efeito estufa pois o carbono em questão fora fixado anteriormente de forma biológica.

Para Saer *et al.* (2013), a compostagem pode trazer impactos ambientais negativos com lançamento de dióxido de carbono na atmosfera devido ao uso de combustíveis fósseis nos equipamentos de transporte e processamento. A parcela de CO₂ proveniente do consumo de combustível e energia deve ser contabilizada como prejudicial ao efeito estufa. Métodos de compostagem de forma descentralizada permitem grandes reduções de emissões de GEE, tendo em vista que o tratamento ocorre geralmente próximo ou no próprio local de geração.

Quanto à produção de CO₂ oriundo de processos não biológicos, a compostagem em leiras estáticas com aeração passiva apresenta a vantagem da ausência de equipamentos e máquinas para o fornecimento de oxigênio. Leiras revolvidas comumente são reviradas com máquinas robustas, enquanto que leiras estáticas com aeração forçada demandam energia.

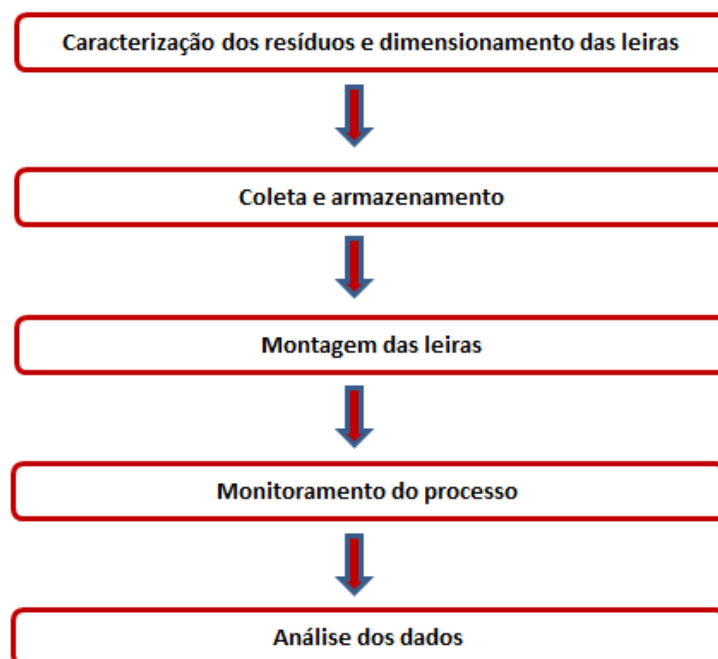
A utilização de compostos orgânicos reduz a necessidade de uso de pesticidas e fertilizantes químicos, contribuindo para minimização das emissões de GEE do processo de produção dos insumos sintéticos (SÁNCHEZ *et al.*, 2015).

Diversos estudos de Análise do Ciclo de Vida enfatizam que a compostagem gera menos impactos ao meio ambiente quando comparada a outros modelos de eliminação de resíduos orgânicos, como incineração e aterros sanitários (SAER *et al.*, 2015). Lundie e Peters (2005) determinaram que a compostagem realizada de modo centralizado gera menos gases de efeito estufa e consome menos água que a deposição a em aterro sanitário.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em cinco etapas (Figura 7). Inicialmente foram analisadas as características físicas e químicas dos resíduos a serem utilizados para o correto dimensionamento da proporção entre estes. Na fase operacional houve a coleta dos resíduos nos Restaurantes Universitários (RU) e armazenamento em recipiente vedado até o dia posterior. Em seguida, os resíduos de alimento e de podas foram misturados na proporção estabelecida e as leiras montadas no pátio. O monitoramento dos fatores necessários para o desenvolvimento da compostagem foi empregado, a partir da formação de cada leira, durante o período de 135 dias. Por fim, os dados foram analisados.

Figura 7 - Desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.1 Generalidades

O estudo foi desenvolvido com a formação de 12 leiras com proporção dos materiais de 1:1,5 em massa com base úmida de restos de alimentos dos restaurantes da

Universidade Federal do Ceará localizada (UFC) no Campus do Pici e podas de árvores da cidade de Fortaleza (CE), respectivamente. As leiras foram combinadas com diferentes alturas, formas de operação e montagem.

Os resíduos orgânicos dos restaurantes universitários são restos de comidas que ficam nos pratos dos usuários, além de alimentos que foram ofertados nas bandejas durante o almoço, mas não consumidos. O *menu* consiste usualmente em carnes, saladas, arroz, feijão, farofa e frutas. Já as podas, que são constituídas de galhos e folhas da arborização urbana, foram fornecidas pela empresa Cosampa, que encaminhou o material já triturado para a área de compostagem.

Foram escolhidos esses tipos de resíduos por dois motivos. O primeiro devido à proximidade da área de compostagem das fontes geradoras, facilitando a coleta e recebimento destes com a frequência desejada. O segundo motivo pelo fato de tanto os resíduos dos restaurantes, semelhantes à fração orgânica dos resíduos domésticos, quanto as podas de árvores da zona urbana são materiais presentes em grandes quantidades nas cidades e são comumente um desafio para os gestores públicos.

O experimento foi realizado na área de pesquisa do Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE) da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC) localizada nas seguintes coordenadas: 3°44'58.27"S e 38°34'42.07"O. As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental (LABOSAN) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA). É possível observar na Figura 8 que a área destinada para a compostagem se trata de um local aberto, e assim, sofreu influência de fatores externos como incidência do sol, ventos e chuvas.

Figura 8 - Área de compostagem no NUTEC, Campus do PICI



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Os alimentos foram coletados previamente segregados em sacos plásticos após o almoço e armazenados dentro de uma caixa d'água com tampa (Figura 9), para evitar a atração de possíveis animais, e utilizados na manhã seguinte na montagem da leira. Como os funcionários dos restaurantes já tinham o costume de fazer a separação dos resíduos antes do início da pesquisa, pequenas quantidades de materiais inertes foram encontradas, porém facilmente percebidas e retiradas.

As podas foram estocadas em montes depositados pelos caminhões basculantes com caçambas com volume de 4m³, em pilhas com aproximadamente 1 metro de altura (Figura 10).

Figura 9 - Recipiente para armazenamento dos restos de alimentos



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura 10 - Recebimento das podas



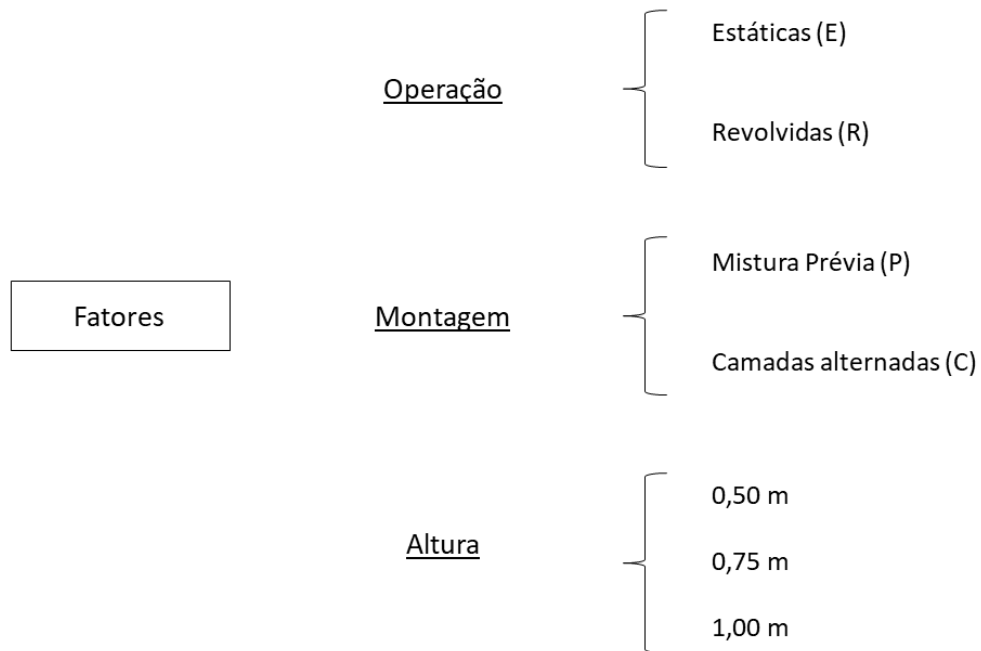
Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.2 Montagem e desenvolvimento

12 leiras foram formadas da seguinte maneira: quanto às alturas, 4 leiras com 0,50 m, 4 leiras com 0,75m e 4 leiras com 1,00 m; em relação à forma de montagem, 6 leiras com

homogeneização prévia na betoneira e 6 leiras formadas em camadas alternadas de alimentos e podas; e quanto à operação, 6 leiras sem revolvimento (estática) e 6 leiras com revolvimento manual com auxílio de pá e enxada. A Figura 11 apresenta a configuração do delineamento.

Figura 11 - Configuração do delineamento da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

No desenvolvimento da pesquisa, foram montadas duas leiras por semana durante 45 dias, totalizando 12 leiras. O Quadro 8 apresenta a identificação de cada leira com as informações detalhadas. Por não ser viável o desenvolvimento de replicatas (devido ao tempo necessário e esforço empregado), as leiras foram divididas em lados A e B para que os dados das análises pudessem ser comparados.

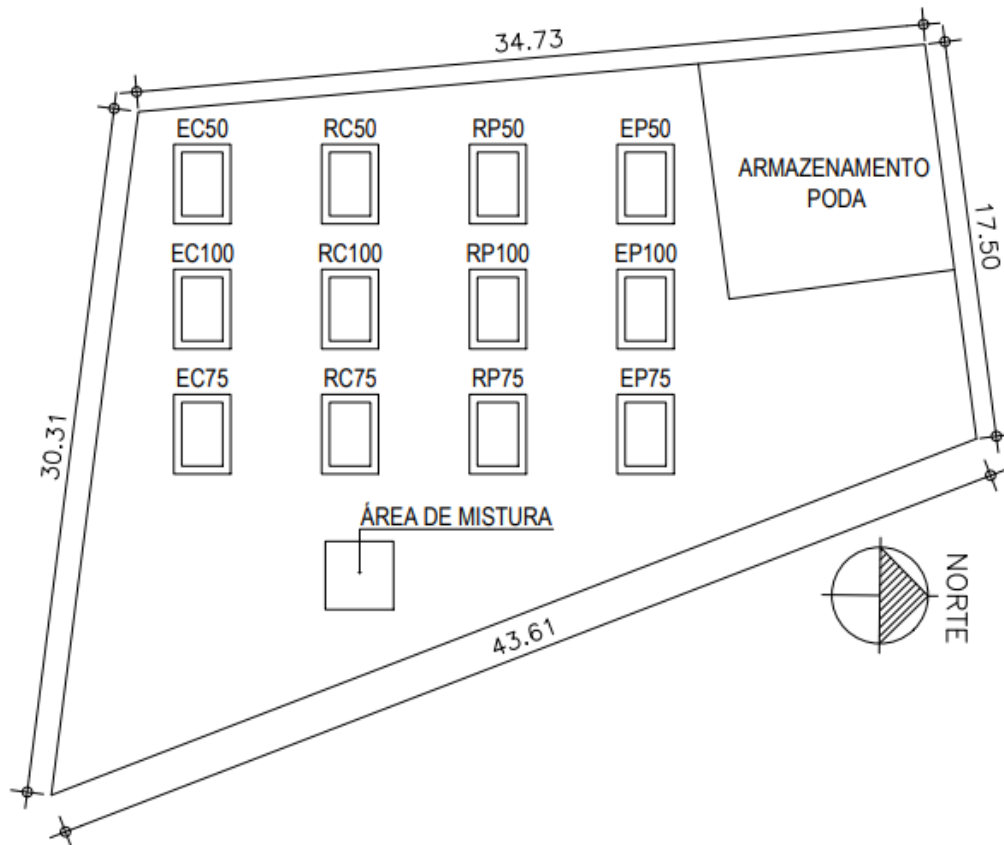
Quadro 8 - Identificação das leiras

Leira	Operação	Montagem	Altura
EP100	Estática	Mistura Prévia	1,00 m
EP50	Estática	Mistura Prévia	0,50 m
EP75	Estática	Mistura Prévia	0,75 m
RP100	Revolvimento	Mistura Prévia	1,00 m
RP50	Revolvimento	Mistura Prévia	0,50m
RP75	Revolvimento	Mistura Prévia	0,75 m
EC100	Estática	Camadas	1,00 m
EC50	Estática	Camadas	0,50 m
EC75	Estática	Camadas	0,75 m
RC100	Revolvimento	Camadas	1,00 m
RC50	Revolvimento	Camadas	0,50 m
RC75	Revolvimento	Camadas	0,75 m

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

As leiras foram arquitetadas com aproximadamente 2,80 m de comprimento e 1,80 m de largura. A Figura 12 demonstra a configuração do pátio de compostagem com a área de mistura com betoneira, leiras e armazenamento das podas.

Figura 12 - Configuração pátio de compostagem



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Antes da formação das leiras, os sacos de alimentos eram pesados para se obter a proporção adequada de poda. Foi utilizada a balança da empresa Digi-Tron com capacidade de 500 kg.

No caso das leiras com mistura prévia, foi utilizada uma betoneira de 400 litros para facilitar a homogeneização dos materiais (Figura 13). Já para as leiras montadas em camadas, foram alternadas parcelas com espessuras aproximadas de 0,025 m de alimento e 0,10 m de poda (Figura 14), com a última camada de poda.

Figura 13 – Vista do processo de homogeneização prévia dos resíduos em betoneira



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura 14 - Montagem das leiras em camadas alternadas



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Metade das leiras foram revolvidas, enquanto que a outra metade permaneceu estática. O revolvimento manual ocorreu no 3º, 7º, 10º, 14º, 21º e 27º, dia com o uso de pá e enxada (Figura 15), procurando introduzir as camadas externas no interior das leiras.

As irrigações foram realizadas com tubos micro perfurados em torno das leiras (Figura 16) com uma frequência de duas vezes por semana durante os 60 dias iniciais. O volume de água utilizado na irrigação foi de aproximadamente 450 litros por leira em cada semana.

Figura 15 - Revolvimento com enxadadas leiras de compostagem



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura 16– Sistema de irrigação com tubos micro perfurados nas leiras



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.3 Monitoramento do experimento

As coletas das amostras foram executadas com o uso de um trado em dois pontos com alturas diferentes nas três laterais de cada parcela e com uma massa total de aproximadamente 250g (Figura 17). Os critérios de coleta seguiram o padrão determinado pela Norma Brasileira 10007 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Figura 17 - Coleta de amostra nas leiras de compostagem



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

As análises de Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio Total (NT) foram realizadas nos períodos de 0, 45, 90 e 135 dias após a montagem de cada leira, enquanto que as análises de pH e umidade foram realizadas duas vezes por semana nos primeiros noventa dias e uma vez por semana durante o resto do experimento. Já a temperatura, foi monitorada com uma frequência de três vezes por semana nos primeiros noventa dias e uma vez por semana no período restante. As análises de Condutividade Elétrica (CE) e Índice de Germinação (IG) foram realizadas nos centésimo trigésimo quinto dias de cada parcela. Foram pesados os resíduos adicionados inicialmente de cada leira com mistura prévia, assim como os seus compostos orgânicos produzidos, para a análise de balanço de massa.

O material coletado foi armazenado em recipiente de plástico seco com volume de 4,5 litros (Figura 18). Após homogeneização da amostra, uma parte era separada para análise de pH *in natura* e outra parcela colocada na estufa a 65°C para secagem e medição de umidade. Para análises de COT, NT, CE e ÍG, após a secagem as amostras foram trituradas e passadas em peneiras com abertura de malha de 2 mm.

Figura 18 - Recipiente utilizado na coleta de amostras nas leiras de compostagem



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

A temperatura foi monitorada em uma seção de cada parcela em profundidades diferentes, de acordo com o tamanho da leira. As medições para leiras de 1,00 m foram efetuadas a 0,20 m, 0,40 m, 0,60 m e 0,80 m de profundidade; leiras de 0,75 m foram monitoradas temperaturas em 0,20 m, 0,40 m e 0,60 m de profundidade e leiras com 0,50m de altura pontos com 0,20m e 0,40m de profundidade.

A temperatura do ambiente era medida sempre que havia o monitoramento das temperaturas das leiras. Utilizou-se um termopar modelo GUL Term 180 da marca GULTON com haste de 1 metro (Figura 19).

Figura 19–Termopar para monitoramento da temperatura das leiras de compostagem



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

As metodologias das análises de umidade, pH, COT, NT, CE e IG são indicadas no Quadro 9. A relação C/N é calculada pela divisão entre as porcentagens do carbono orgânico e nitrogênio, ambos relacionados à amostra em base seca.

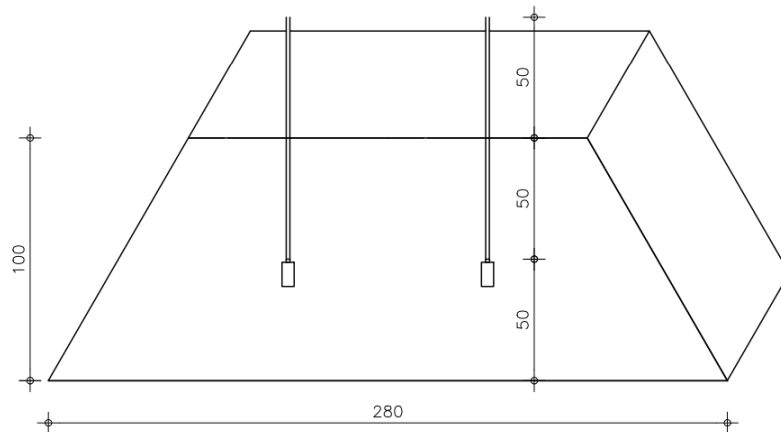
Quadro 9 - Metodologias das análises

Análise	Metodologia
Umidade	Brasil (2007)
pH	Brasil (2007)
Carbono Orgânico Total	Brasil (2007)
Nitrogênio Total	Silva (2009)
Condutividade Elétrica	Brasil (2007)
Índice de Germinação	Zuconiet <i>al.</i> (1988)

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

As medições dos gases da leira EP100 foram realizadas durante os 90 dias iniciais em dois pontos da leira com altura de 0,50 m (Figura 20 e 21). As leituras foram efetuadas com o equipamento GEM 5000 (Figura 22), comumente usado para análises de composição do biogás gerado em aterros sanitários.

Figura 20 - Detalhamento dos pontos de amostragem da medição dos gases



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura 21 - Leitura dos gases na leira EP100 com GEM 5000



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Foi montado um sistema de drenagem com recipientes de polietileno tereftalato, de forma que a superfície foi perfurada em diversos pontos com aberturas de 2 milímetros de diâmetro. A tampa do recipiente foi conectada ao tubo de silicone de 1 metro de comprimento com diâmetro interno de 8 milímetros, que permitia a vedação e a coleta dos gases pelo

equipamento GEM 5000. Uma rolha de vedação foi encaixada no tubo, de forma que o gás não escapasse (Figura 21).

Figura 22 - Detalhe do sistema de drenagem e equipamento GEM 5000



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

O sistema era preenchido pelos gases gerados no interior da leira durante o processo e permanecia vedado até o momento das medições. No momento da aferição, que durava 3 minutos, o GEM 5000 era conectado ao tubo de silicone até a estabilização do equipamento e a mensuração da composição dos gases. Em seguida o tubo era novamente vedado até a próxima medição.

4.4 Análise dos dados

A análise de variância (anova) e o teste de Tukey foram realizados para se avaliar a influência dos métodos de operação, montagem e alturas com suas combinações no desenvolvimento da temperatura e umidade durante a compostagem. Utilizou-se como ferramenta para a realização dos testes o software R.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos resíduos

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises químicas e físicas dos restos de alimentos e podas trituradas para a caracterização dos resíduos empregados no estudo. As análises ocorreram etapa anterior ao desenvolvimento das leiras, com o objetivo caracterizar individualmente cada material.

Os restos alimentares dos restaurantes universitários, ao contrário das podas trituradas, apresentaram pH abaixo da faixa estabelecida como ideal por Russo (2003) que gira em torno de 5,5 a 8,0. Caso o valor de pH após a mistura seja inferior a 4,0 pode haver uma diminuição da atividade biológica, tendo em vista que uma pequena quantidade de microrganismos atuam ativamente em faixas muito ácidas de pH.

Os resultados encontrados de relação C/N de 15,59 para os alimentos e 23,64 para as podas foram próximos aos determinados por Marques *et al.* (2016) em estudo relacionado à compostagem de podas de árvores e resíduos domiciliares. Na referida pesquisa, o autor encontrou relação C/N de 19,81 para podas e 15,56 para restos de alimentos.

É possível observar que a poda tem uma relação C/N baixa devido a folhas ou galhos as espécies usadas no paisagismo urbano geraram isso. Devido à baixa relação C/N das podas, não houve possibilidade de iniciar os processo com relações próximas do valor de 30/1, faixa essa vastamente considerada como ideal pela literatura em questão.

A proporção em volume da mistura dos materiais na formação das leiras é de aproximadamente uma parte de alimentos para três partes de podas. A quantidade de água presente em cada material não foi um empecilho para o desenvolvimento da compostagem.

Tabela 1 - Caracterização dos resíduos utilizados para compor as leiras de compostagem

Resíduo	Carbono orgânico	Nitrogênio Total	Relação C/N	pH	Umidade	Densidade
Alimento	42,57%	2,73%	15,59	5,11	67,90%	725 kg/m ³
Poda	43,03%	1,82%	23,64	6,86	28,00%	350 kg/m ³

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

5.2 Temperatura

As Figuras 23, 24 e 25 apresentam o desenvolvimento médio das temperaturas, de acordo com as alturas empregadas. A linha de base identifica as alternâncias das faixas mesofílicas e termofílicas, enquanto que a linha CONAMA está relacionada à temperatura de 55 °C que as leiras devem alcançar, por pelo menos 14 dias, para que o composto orgânico seja considerado higienizado.

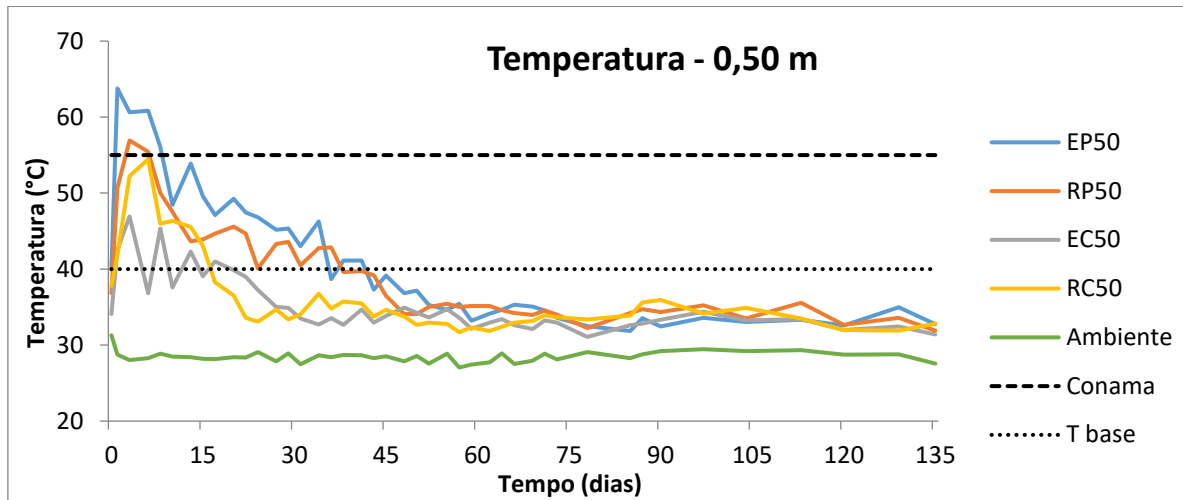
É possível observar que um dia após a formação das leiras já foram encontrados valores acima de 40 °C, correspondentes à faixa termofílica, segundo Pereira Neto (2014). A manutenção de temperaturas em valores termofílicos garante que o processo está ocorrendo com alta velocidade de degradação e eficiência (PEREIRA NETO, 2014). De forma geral, houve a predominância inicial da fase de degradação ativa seguida por uma redução das temperaturas nas leiras na fase de maturação.

Quanto às leiras com 0,50 m de altura, a EP50 se destacou das demais por alcançar o maior valor de temperatura de 63,77 °C e, junto com a RP50, manteve valores na faixa termofílica durante aproximadamente 36 dias. As leiras EC50 e RC50 apresentaram temperaturas termofílicas por cerca de 16 dias e temperaturas máximas de 46,92 °C e 54,45 °C, respectivamente. Após 45 dias, as referidas leiras passaram a apresentar valores semelhantes.

A leira RP75 obteve o maior valor de temperatura para leiras com 0,75 m de altura, atingindo 64,1 °C no terceiro dia após sua formação. A permanência na faixa termofílica durou 48 dias, enquanto que a leira EP50 se manteve por 36 dias. Seguindo o exemplo das leiras sem mistura prévia dos resíduos com 0,50 m de altura, as leiras EC75 e RC75 demonstraram menores temperaturas, com duração de 27 dias na faixa termofílica.

Em relação às leiras com 1,00 m de altura, a leira EP100 obteve a fase de degradação ativa mais extensa com 80 dias, com a maior temperatura encontrada de 65,96 °C entre todas as leiras. As temperaturas máximas encontradas nas demais leiras com 1,00 m de altura foram de 59,77 °C, 57,28 °C e 61,72 °C para RP100, EC100 e RC100.

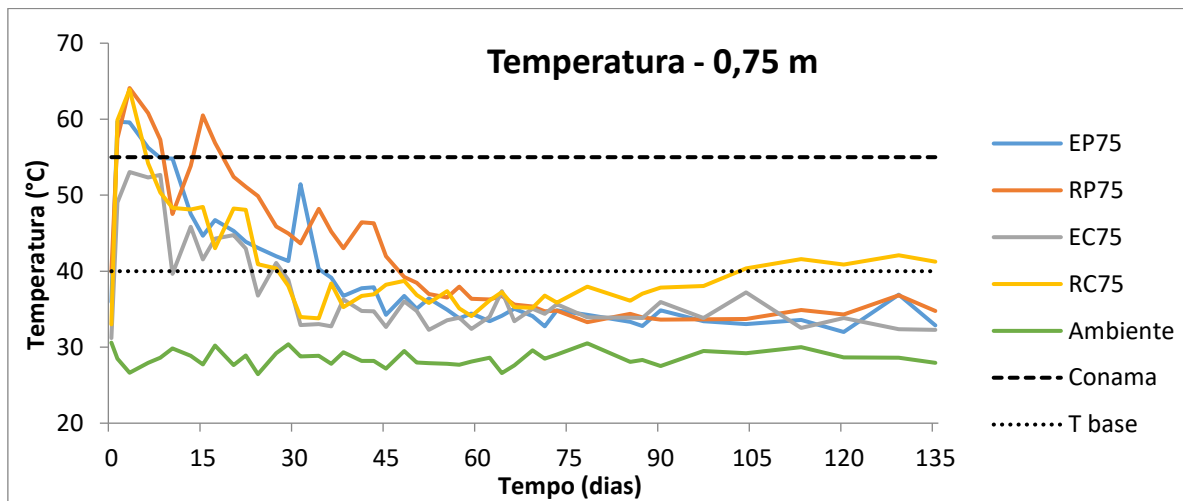
Figura 23 - Médias de temperatura para leiras com 0,50 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC50: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; EP50: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m; RC50: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; RP50: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m.

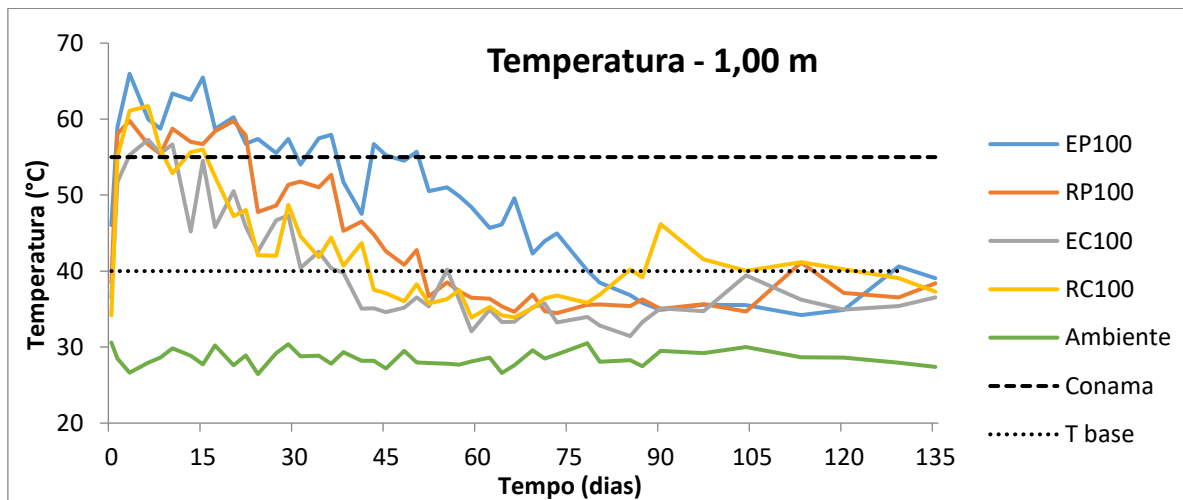
Figura 24 - Médias de temperatura para leiras com 0,75 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC75: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; EP75: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m; RC75: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; RP75: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m.

Figura 25- Médias de temperatura para leiras com 1,00 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC100: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; EP100: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m; RC100: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; RP100: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m.

Com exceção das leiras EC50, EC75, RC50 e RC75, todas as leiras mantiveram médias das temperaturas na faixa termofílica por pelo menos 30 dias. Apenas a leira EP100 esteve de acordo com a Resolução n° 481 do CONAMA, que estabelece um período mínimo de 14 dias com temperaturas acima de 55 °C para que o composto seja classificado como higienizado. A leira EP100 manteve os valores estabelecidos da referida resolução nas 4 profundidades monitoradas. Em contrapartida, as leiras RP100 e RC100 alcançaram tal margem apenas nas profundidades de 0,20 m e 0,40 m e a leira EC100 não atingiu esse requisito em nenhuma região.

As leiras revolvidas provavelmente não atingiram temperaturas acima de 55 °C por 14 dias seguidos porque, ao serem revolvidas, há uma liberação do calor interno para o meio ambiente. No caso das leiras estáticas montadas em camadas, não ocorreu uma interação adequada com os dois tipos de resíduos utilizados, já que não houve homogeneização destes.

Andrade *et al.* (2018), em estudo comparativo entre leiras estáticas e leiras com controle de revolvimento, constataram que a fase termofílica é mais curta para leiras com revolvimento, pois a aeração possibilita um aumento na velocidade da degradação dos resíduos. Na compostagem em leiras com aeração passiva é necessário um tempo mais prolongado para que o composto orgânico seja considerado maturado (RASAPORR; ADL; POURAZIZI, 2016). Park *et al.* (2011), em pesquisa de compostagem com diferentes sistemas de aeração, evidenciaram que leiras estáticas com aeração passiva aqueceram mais

quando comparadas com aeração forçada e revolvimento de leiras e que a temperatura para o sistema com aeração natural reduziu lentamente ao longo do tempo. Em contrapartida, em leiras com aeração passiva existe maior possibilidade de higienização devido à fase termofílica mais duradoura.

A Tabela 2 apresenta a comparação das temperaturas encontradas nas leiras em relação aos fatores analisados na pesquisa.

Tabela 2 - Comparação das temperaturas de acordo com os fatores analisados

Temperatura Média dos Fatores					
Operação	Média (°C)	Montagem	Média (°C)	Altura (cm)	Média (°C)
Revolvidas	41,82	Mistura Prévia	43,67	50	38,22
Estáticas	41,68	Camadas	39,65	75	40,22
				100	45,04
Temperatura Média Métodos					
		Método	Média (°C)		
		EP	44,58		
		RP	42,68		
		EC	38,42		
		RC	40,91		

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC: Leiras estáticas formadas em camadas alternadas; EP: Leiras estáticas formadas com mistura prévia; RC: Leiras revolvidas formadas em camadas alternadas; RP: Leiras revolvidas formadas com mistura prévia

Usando o teste de variância anova na comparação das médias de temperaturas, percebeu-se que houve diferenças significativas (p -valor $< 0,05$) entre as alturas. Como era esperado, temperaturas mais elevadas ocorreram para leiras com maiores alturas. Tal fato pode ser explicado pela maior capacidade de retenção de calor para leiras com maiores alturas e volumes. As leiras com menores dimensões apresentam uma maior relação área/volume, facilitando a perda de calor da região interna para o meio ambiente.

Quanto a formas de operação, não houve diferença significativa entre os métodos empregados (p -valor $> 0,05$). Contudo as diferentes formas de montagem apresentaram diferenças significativas (p -valor $< 0,05$) em relação à manutenção de calor no interior das leiras. A mistura prévia dos resíduos aumentou 4,02 °C, em média, os valores das temperaturas em relação ao método de montagem em camadas utilizados tradicionalmente.

Tais dados indicam que para as condições impostas na pesquisa, a homogeneização prévia dos materiais se mostrou mais importante que os revolvimentos para fornecimento de oxigênio.

As leiras ECs obtiveram menores desempenhos quanto à manutenção das temperaturas com valores elevados quando comparadas às leiras RPs e EPs, segundo o teste de Tukey (p -valor $< 0,05$). Tal fato implica em pouca eficiência da eliminação de possíveis microrganismos patogênicos e ervas daninhas, assim como um indicativo da baixa interação da biota com os resíduos. A estratificação por camadas sem o revolvimento das leiras dificultou a ação microbiológica.

As leiras estáticas com aeração passiva (EPs) apresentaram as maiores médias de temperatura em relação às leiras RCs e ECs (p -valor $< 0,05$). Segundo Guermandi (2015), só ocorre a liberação de calor devido ao aumento das atividades metabólicas dos microrganismos caso haja oxigênio disponível no ambiente. É possível afirmar que a aeração passiva não restringiu a ação dos microrganismos já que a leira EP100 manteve temperaturas mais elevadas por maior período.

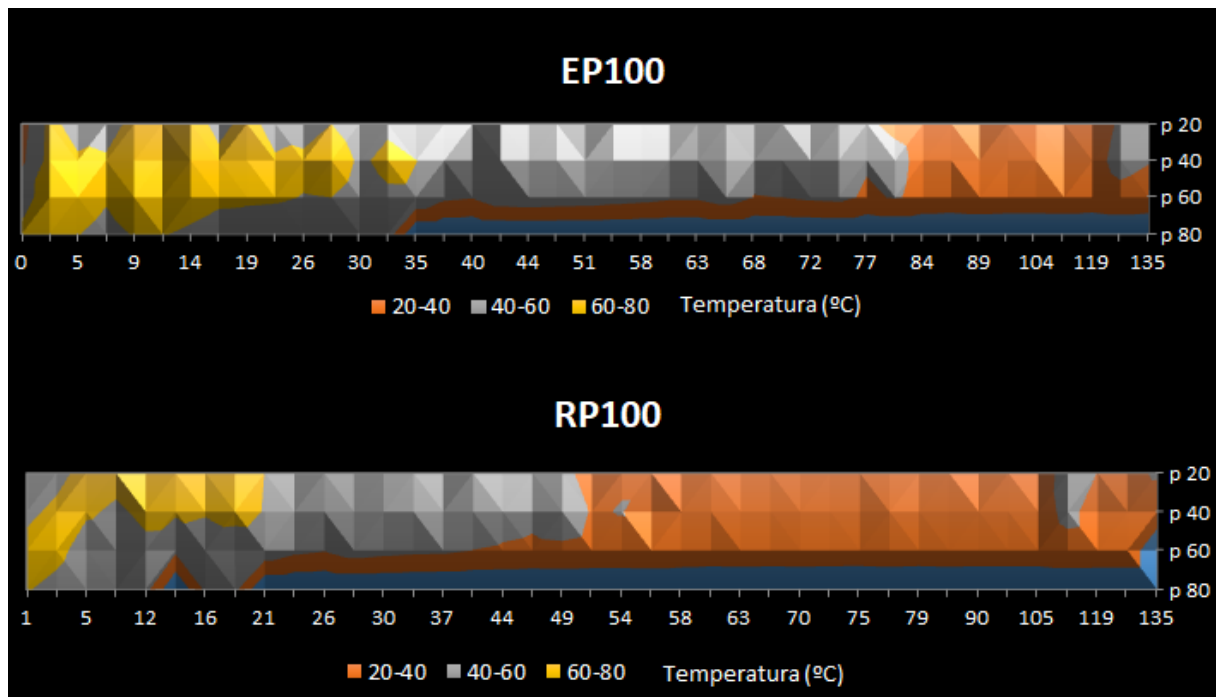
As variações das temperaturas ao longo da profundidade durante os 135 dias de compostagem podem ser observadas nas leiras EP100 e RP100 da Figura 26. O eixo vertical apresenta as profundidades analisadas em centímetros e o eixo horizontal o tempo em dias. Os demais gráficos com os valores de temperatura através dos perfis verticais das leiras são apresentados no Apêndice A. O Apêndice B exhibe os resultados monitorados de todas as leiras durante o estudo.

As regiões centrais e superficiais, devido ao maior suprimento de oxigênio, apresentam temperaturas mais elevadas em relação às regiões inferiores. Portanto existe uma estratificação do calor ao longo da profundidade das leiras, o que fica mais evidente nas leiras sem revolvimento. Variações semelhantes foram observadas em estudo realizado por Larney e Olson (2006) em que leiras estáticas com aeração passiva apresentaram menores temperaturas nas regiões inferiores.

Apesar dessa questão, a leira EP100 esteve dentro dos critérios de higienização estabelecido pelo CONAMA em todas as profundidades monitoradas.

Com o intuito de aumentar a quantidade de resíduos tratados para uma determinada área, poderiam ser empregadas alturas ou larguras maiores das leiras estáticas, desde que as temperaturas não ultrapassem valores acima de 70 °C, como indicado por Kiehl (1985). O autor relata que acima desse valor uma grande parcela dos microrganismos benéficos ao processo passa a reduzir suas atividades biológicas ou até mesmo são eliminados.

Figura 26 – Estratificação de temperatura para Leiras EP100 e RP100



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EP100: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m; RP100: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m.

5.3 Umidade

As variações da umidade são apresentadas nas Figuras 27, 28 e 29. A forma e frequência das irrigações se mostraram inadequadas na manutenção da umidade em valores considerados ideais, entre 40 % e 65 %, por Inácio e Miller (2009) e Cordeiro (2010). Acima desse intervalo, ocorre redução da passagem de oxigênio devido ao excesso de água, podendo criar zonas de anaerobiose (OLIVEIRA, 2010).

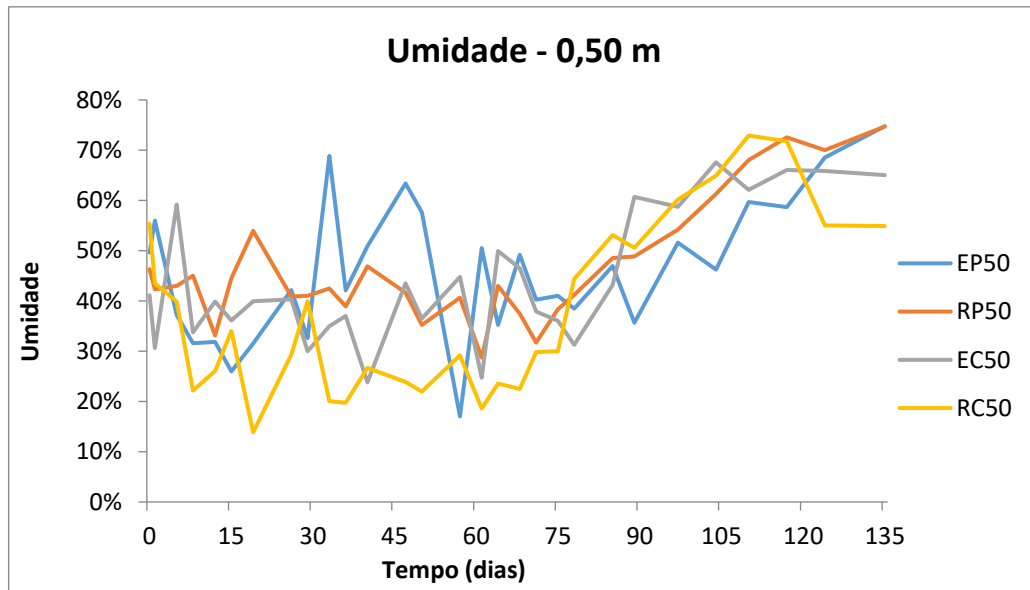
Durante a compostagem, ocorre um acréscimo de umidade devido as precipitações, irrigação e formação de água metabólica, contudo a quantidade de água evaporada é maior que o volume acrescido e a umidade da leira tende a diminuir durante o desenvolvimento do processo (INÁCIO; MILLER, 2009).

Não foi realizada modificação da frequência ou forma de irrigação das leiras ao perceber que o método utilizado não era ideal na manutenção da umidade. Tal método foi

permanecido com o intuito de não favorecer leiras montadas posteriormente, já que foram formadas ao longo de 45 dias.

Todas as leiras, em algum momento, apresentaram umidade abaixo de 40 %, o que pode reduzir a atividade microbiana. A atividade biológica dos microrganismos cessa quando o conteúdo de umidade está abaixo de 15 % (INÁCIO; MILLER, 2009).

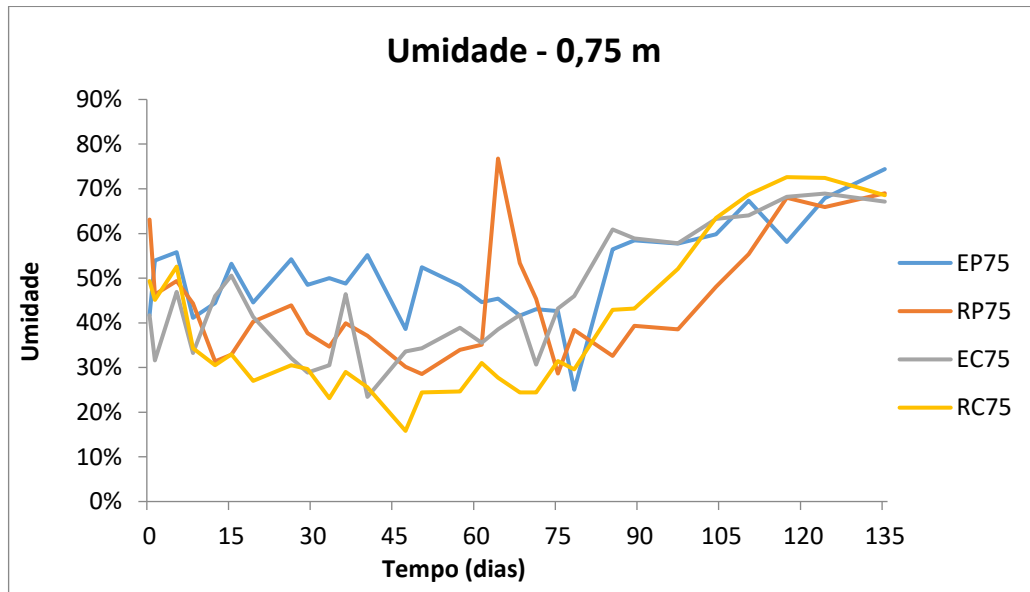
Figura 27 – Médias de umidade para Leiras com 0,50 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC50: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; EP50: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m; RC50: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; RP50: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m.

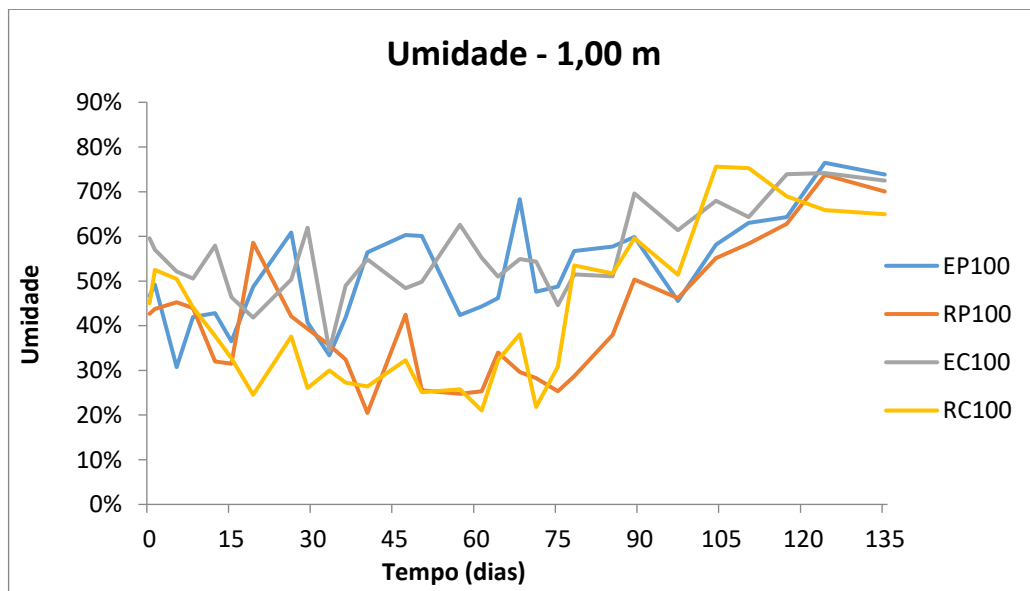
Figura 28 – Médias de umidade para Leiras com 0,75 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC75: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; EP75: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m; RC75: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; RP75: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m.

Figura 29 – Médias de umidade para Leiras com 1,00 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC100: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; EP100: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m; RC100: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; RP100: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m.

De forma geral, a partir de aproximadamente 80 dias houve um alto crescimento na umidade para todas as leiras. A elevação pode ser explicada tanto pelo aumento da capacidade de retenção de água ao longo do processo de compostagem, quanto pela maior incidência de chuvas que houve nesse período. Apesar do grande volume de água nas leiras nesse período, não houve geração de maus odores, pois a fração facilmente biodegradável já fora estabilizada e o processo já se encontrava em fase de maturação.

Assim, todas as leiras apresentaram, no fim dos 135 dias, valores acima do máximo de 50 % estabelecido pela IN 25/2009 do MAPA para comercialização dos compostos orgânicos. Diaz, Bertoldi e Bidlingmaier (2007) comentam que é interessante que o composto produzido obtenha umidade menor que 50 %, por facilitar o manuseio, transporte e aplicação no solo. Para Andersen (2011), o excesso de umidade não é um grande problema quando o composto orgânico é utilizado diretamente pelo produtor, sem o objetivo de comercialização.

Nas leiras estáticas com mistura prévia (EPs), foram encontrados os valores de umidade dentro da faixa recomendada pela literatura em 55,17 %, 82,76 % e 79,31 % das medições para alturas de 0,50 m, 0,75 m e 1,00 m. Já para as leiras revolvidas com mistura prévia (RPs), foram determinadas umidades em 62,07 %, 34,48 % e 41,38 % para as mesmas alturas.

Quando se trata das leiras montadas em camadas e sem revolvimento (ECs), os resultados de umidade estiveram dentro faixa em 37,93 %, 48,27 % e 79,31 % das medições para alturas de 0,50 m, 0,75 m e 1,00 m, respectivamente. A técnica com montagem estratificada e com revolvimento, que é a mais comumente empregada, apresentou os piores resultados quanto à umidade. Os valores foram considerados ideais apenas em 31,03 %, 24,14 % e 31,03 % do monitoramento para alturas 0,50 m, 0,75 m e 1,00 m, respectivamente.

Com o teste de variância anova sobre a permanência dos valores de umidade entre 40 e 65 %, constatou-se diferenças significativas (p -valor $< 0,05$) entre leiras estáticas e revolvidas. Ocorre uma redução na umidade das leiras durante o revolvimento, já que parte da água é perdida para o meio ambiente na forma de vapor. Portanto leiras estáticas tendem a manter umidade em valores mais altos, reduzindo a demanda por água.

Não houve diferenças significativas (p -valor $> 0,05$) entre as formas de montagem e alturas empregadas.

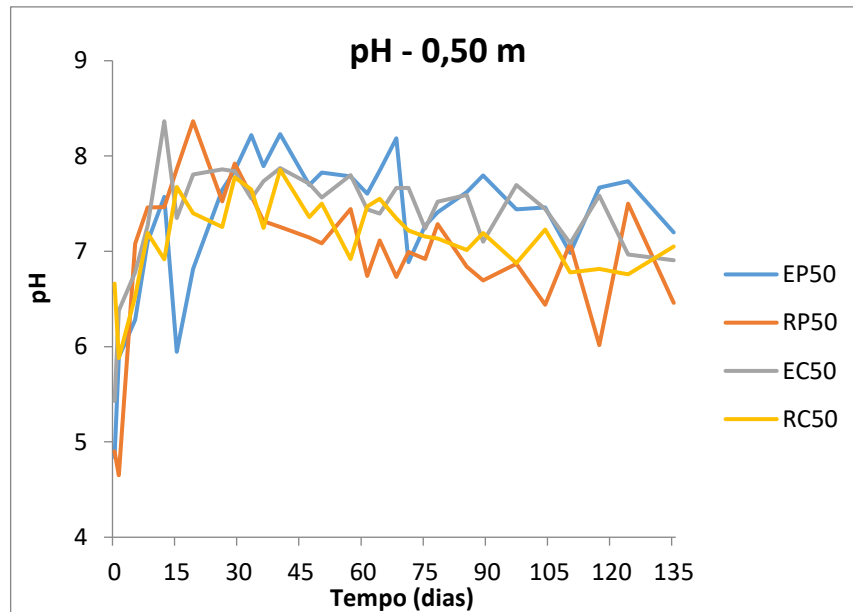
5.4 pH

Os valores de pH durante o processo de compostagem podem ser verificados nas Figuras 30, 31 e 32. Após as misturas dos materiais, o pH das leiras estiveram ligeiramente ácidos, variando entre 4,84 e 6,67. Apenas 5 das 12 leiras (EP75, EP100, EC100, RC50 e RC100) iniciaram dentro da faixa entre 5,5 a 8,0, considerada por Russo (2003) como ideal. Para Pereira Neto (2014), a compostagem pode ser desenvolvida em uma faixa que varia de 4,5 a 9,5. O autor complementa que a geralmente o pH não é um fator crítico, pois os valores extremos são regulados pelos microrganismos que produzem produtos ácidos ou básicos, de acordo com a necessidade do meio.

Em geral, houve aumento do pH logo após a formação das leiras, atingindo valores próximos a 7,0 após 8 dias. A elevação ocorreu devido à degradação das proteínas com liberação do nitrogênio amoniacal. Valores semelhantes variando entre 7,7 e 7,9 foram encontrados em pesquisa realizada por Karnchanawong e Nissaikla (2014), onde foi realizada compostagem de restos de alimentos e folhas secas por aproximadamente 150 dias. Zhu *et al.* (2004) não encontraram diferenças significativas na variação de pH na comparação de compostagem com aeração forçada, passiva e com revolvimento de leiras.

Com exceção da leira RP50, todas as demais apresentaram, após 135 dias, pH dentro do limite mínimo estabelecido pela IN 25 do MAPA para fertilizante orgânico com matéria prima oriunda de lixo domiciliar (6,5).

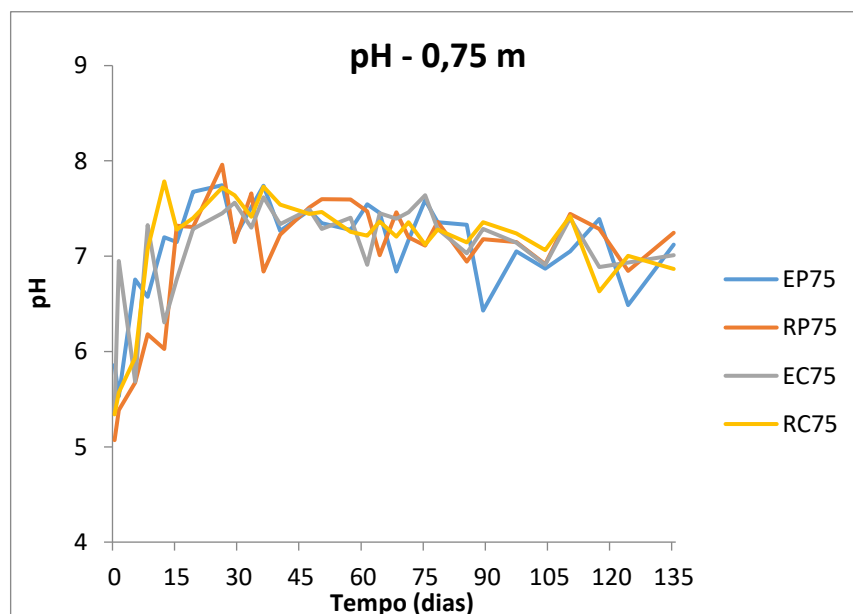
Figura 30 – Médias de pH para Leiras com 0,50 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC50: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; EP50: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m; RC50: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; RP50: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m.

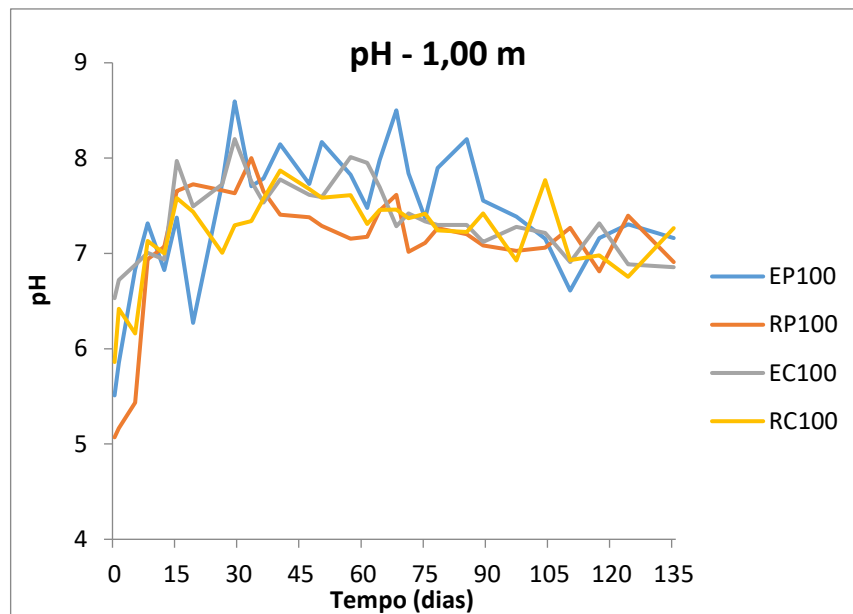
Figura 31 – Médias de pH para Leiras com 0,75 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC75: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; EP75: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m; RC75: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; RP75: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m.

Figura 32 – Médias de pH para Leiras com 1,00 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC100: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; EP100: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m; RC100: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; RP100: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m.

5.5 Relação C/N

Ao serem observados os resultados apresentados nas Figuras 33, 34 e 35, verifica-se que no momento da montagem das leiras (dia zero) houve uma variação da relação C/N de 14,98 para RC50 a 30,58 para RC100.

Durante as análises de caracterização dos restos de alimentos e podas trituradas foi percebido que as duas classes dos resíduos apresentaram baixas relações C/N. Dessa maneira, na formação das leiras não foi possível alcançar a relação C/N próxima de 30/1 (com exceção da RC100), defendida por grande parte da literatura como ideal no início do processo.

Houve uma dificuldade de padronizar a quantidade de nitrogênio e carbono na formação das leiras. Os restaurantes universitários possuem ofertas diferentes ao longo da semana, o que acarreta grande variação da composição dos restos de alimentos. O mesmo ocorre para podas de árvores na zona urbana, que variam as características químicas de acordo

com a espécie. É possível observar a redução da relação C/N nas leiras devido à perda de carbono na forma de gás carbônico.

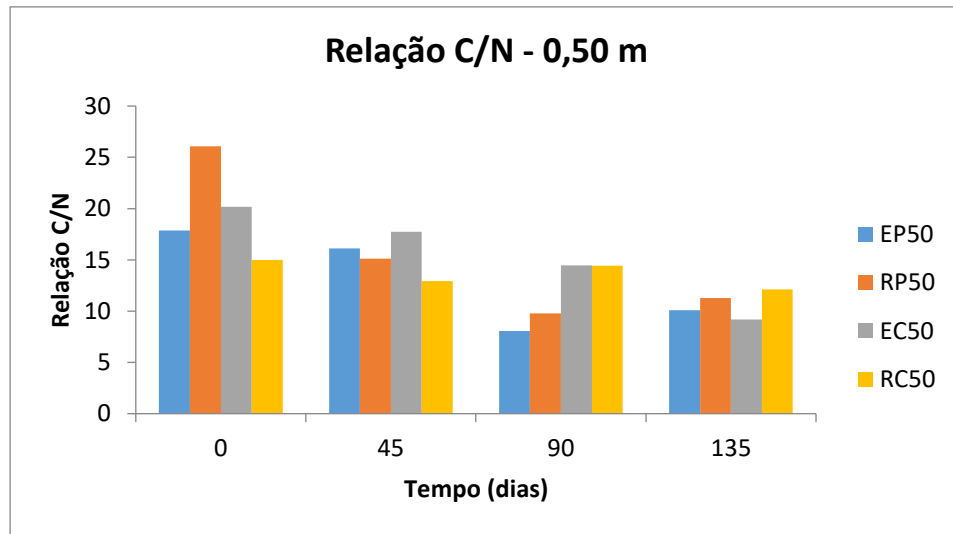
Apesar da grande variação das relações para o dia zero, todos os tratamentos seguiram uma tendência de decaimento da relação C/N no fim do tempo de compostagem e as leiras obtiveram relações próximas de 10/1. Ogunwande (2011) encontrou resultados próximos com variação de 11,7 a 13,6 após 112 dias de compostagem em leiras com aeração passiva. Os microrganismos degradam a matéria orgânica consumindo o carbono e nitrogênio na proporção de 30 partes para 1, eliminando o excesso de carbono na forma de CO₂ e mantendo um terço do carbono no protoplasma da célula que possui uma relação C/N em torno de 10/1 (KIEHL, 1985). Segundo Bernal, Albuquerque e Moral (2009), compostos maduros apresentam geralmente relação C/N abaixo de 20, contudo proporções inferiores a 10 são preferíveis. A redução dos valores observados em todas as leiras indica um alto grau de decomposição dos resíduos.

Após 45 dias da decomposição da matéria orgânica, todas as leiras já apresentavam relação C/N abaixo de 20, apesar das leiras RP75, RP100 e EP100 ainda estarem na fase de degradação ativa. A IN nº 25/2009 estabelece a relação máxima de 20/1 para que o composto possa ser comercializado como fertilizante orgânico.

Em estudo comparativo sobre formas de aeração, Park *et al.* (2011) não encontraram diferenças significativas quanto à redução da relação C/N para leiras com aeração passiva, forçada e revolvidas.

Para as leiras revolvidas, foi possível observar a produção de maus odores no momento do revolvimento. Reis (2005) comenta que caso a relação esteja baixa no início da compostagem pode haver liberação de amônia e odores desagradáveis. Para leiras estáticas não houve problemas com liberação de mau cheiro por não haver revolvimento. Inácio e Miller (2009) comentam que o foco do método em leiras com aeração passiva quando são utilizados restos de alimentos é o controle da proliferação de moscas e mau cheiro.

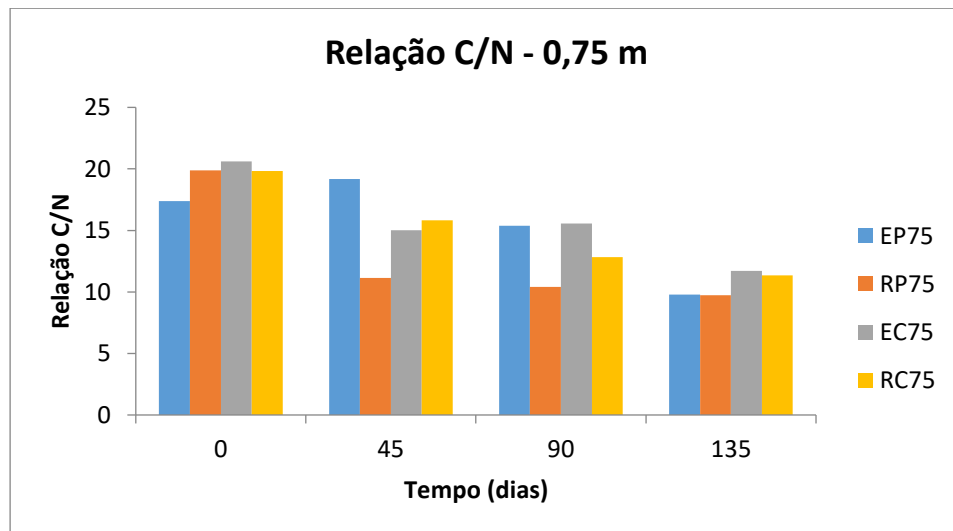
Figura 33 – Variação da relação C/N em leiras com 0,50 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC50: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; EP50: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m; RC50: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,50 m; RP50: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,50 m.

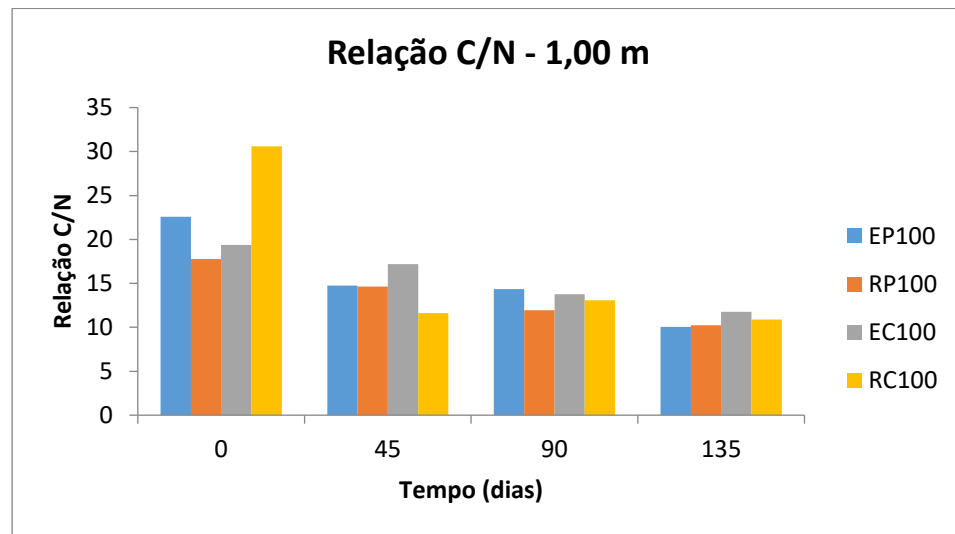
Figura 34 – Variação de relação C/N em leiras com 0,75 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC75: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; EP75: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m; RC75: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 0,75 m; RP75: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 0,75 m.

Figura 35 – Variação de relação C/N em leiras com 1,00 m de altura



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC100: Leira estática, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; EP100: Leira estática, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m; RC100: Leira revolvida, formada em camadas alternadas e altura de 1,00 m; RP100: Leira revolvida, formada com mistura prévia e altura de 1,00 m.

5.6 Condutividade elétrica e índice de germinação

São apresentados na Tabela 3 os resultados das análises de índice de germinação e condutividade elétrica após 135 dias da montagem das leiras. Estes parâmetros estão relacionados à qualidade dos compostos produzidos e segurança da aplicação no solo. A IN 25/2009 do MAPA não informa valor comparativo para tais parâmetros.

Segundo Oliveira (2010), na fase de maturação da compostagem a quantidade de sais presente no composto deve reduzir devido à mineralização da matéria orgânica. Com relação à CE, todas as leiras se encontraram dentro do faixa de até 4,0 mS/cm, considerada por Kiehl (1998) como tolerável para as plantas. Os valores ficaram abaixo dos encontrados em estudo realizado por Ogunwande (2011) que, após 112 dias de compostagem de esterco de aves e serragem em leiras com aeração passiva, obteve valores acima de 2,5 mS/cm.

Em estudo de compostagem envolvendo restos de comidas de restaurantes universitários e podas trituradas, Freitas (2016) constatou valores de CE entre 0,60 e 4,90 mS/cm após 150 dias. É possível reduzir a concentração de sais em leiras de compostagem ao adicionar materiais estruturantes (FAVERIAL; SIERRA, 2014). A utilização de compostos

orgânicos em grandes quantidades com alta concentração salina pode afetar o desenvolvimento das sementes (FREITAS, 2016).

O Índice de Germinação é um parâmetro que avalia a presença de fitotoxicidade do composto a partir da determinação relativa da germinação das sementes e crescimento das raízes (ZHU *et al.*, 2004). Para valores maiores do IG, menor será a presença de substâncias no composto orgânico que possam inibir a germinação das sementes (BELO, 2011).

Segundo Belo (2011), além dos ácidos orgânicos formados como subproduto da decomposição biológica, a presença de metais pesados, pesticidas ou excesso de sais pode inibir o crescimento das plantas devido a inerente toxicidade.

As leiras revolvidas formadas em camadas alternadas de resíduos resultaram em maiores valores para índice de germinação. Belo (2011) ressalta que não há uniformidade quanto à qualificação da fitotoxicidade com relação ao IG, contudo 60 é o número mais comumente citado como inibição de germinação moderada para aplicação no solo. De acordo com Zucconi *et al.* (1981), índice de germinação com valor abaixo de 50 % indica imaturidade do composto. Baseado nesse valor, as leiras sem revolvimento e formadas por camadas (ECs) apresentam algum tipo de toxicidade para a germinação das sementes.

Para as leiras ECs não houve homogeneização dos resíduos em nenhum momento, já que foram montadas de forma estratificada e não houve revolvimento ao longo do processo de compostagem. Tal fato pode concentrar a quantidade de ácidos orgânicos em determinadas regiões das leiras, contribuindo para os altos valores de fitotoxicidade encontrados.

Tabela 3 - Representação das médias de condutividade elétrica e índice de germinação

Leira	CE (mS/cm)	IG
EP100	1,7	70,16
EP75	1,64	98,03
EP50	1,2	140,83
RP100	1,59	77,84
RP75	1,22	83,71
RP50	1,1	75,39
EC100	1,03	58,37
EC75	1,07	34,69
EC50	0,77	43,5
RC100	1,41	142,68
RC75	1,08	161,7
RC50	0,72	185,01

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EC50: Leira estática formada em camadas alternadas com altura de 0,50 m; EC75: Leira estática formada em camadas alternadas com altura de 0,75 m; EC100: Leira estática formada em camadas alternadas com altura de 1,00 m; EP50: Leira estática formada com mistura prévia com altura de 0,50 m; EP75: Leira estática formada com mistura prévia com altura de 0,75 m; EP100: Leira estática formada com mistura prévia com altura de 1,00 m; RC50: Leira revolvida formada em camadas alternadas com altura de 0,50 m; RC75: Leira revolvida formada em camadas alternadas com altura de 0,75 m; RC100: Leira revolvida formada em camadas alternadas com altura de 1,00 m; RP50: Leira revolvida formada com mistura prévia com altura de 0,50 m; RP75: Leira revolvida formada com mistura prévia com altura de 0,75 m; RP100: Leira revolvida formada com mistura prévia com altura de 1,00 m.

5.7 Composição dos gases - O₂, CO₂ e CH₄

A composição dos gases foi medida na leira estática com mistura prévia e altura de 1,00 m durante os 90 dias da fase de degradação ativa e as médias são apresentadas na Figura 36.

Existe uma falta de dados na literatura, a respeito das emissões de gases tanto em leiras estáticas com aeração passiva quanto em leiras com aeração forçada (SÁNCHEZ *et al.*, 2015). Os autores comentam que estudos em escala real relacionados às emissões de gases de efeito estufa devem ser realizados com o objetivo de aumentar o conhecimento sobre a contribuição da compostagem para o aquecimento global.

A concentração de oxigênio foi menor no início do processo devido à maior atividade dos microrganismos nesse período, os quais degradaram os resíduos mais facilmente biodegradáveis. O contrário é verificado com a porcentagem de dióxido de carbono no

interior da leira, pois na medida em que a demanda por oxigênio diminuía era produzido menos CO₂. As maiores concentrações de dióxido de carbono foram constatadas no 5º e 12º dia, com 5,3 %. Após 90 dias de compostagem, foram aferidas concentrações de 19,3 % de gás oxigênio e 0,2 % de dióxido de carbono. Não foi detectado metano na leira para todas as leituras efetuadas pelo GEM 5000. Um baixo grau de maturidade do composto pode ser verificado quando os microrganismos produzem altas taxas de CO₂ (BERNAL; ALBUQUERQUE; MORAL, 2009).

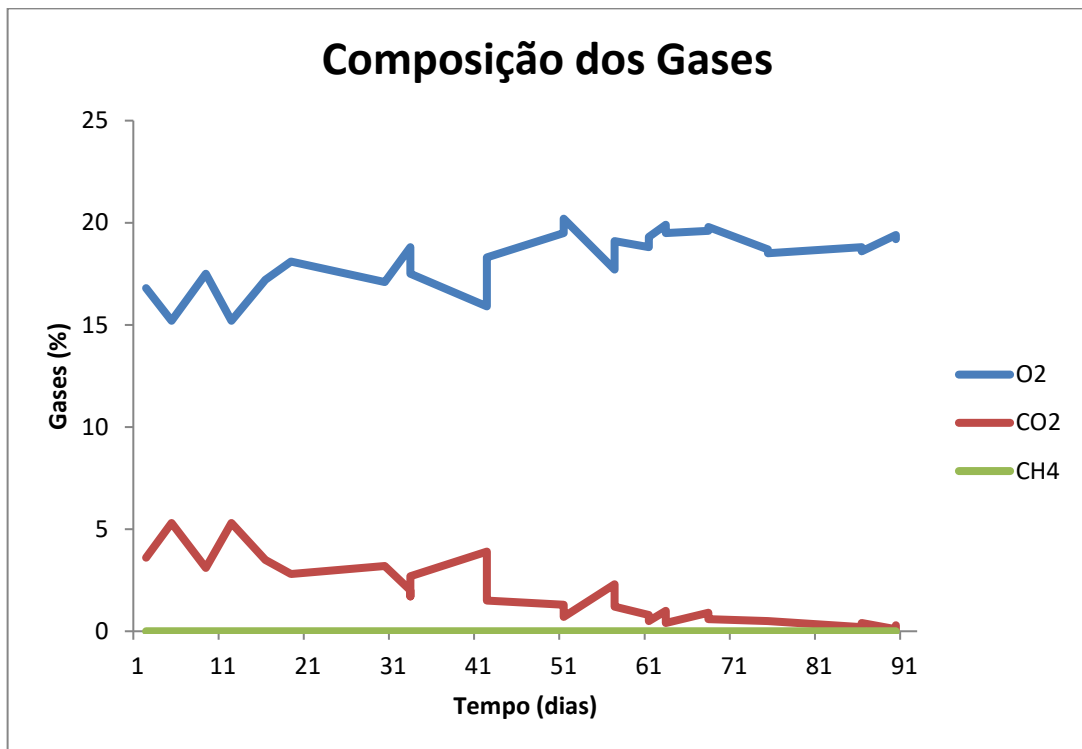
Durante todo o período de análise dos gases, a quantidade de gás oxigênio esteve sempre acima de 15%. Segundo Kiehl (1985), a concentração de gás oxigênio na leira de compostagem deve ser superior a 10% mas valores ideais estão acima de 17%.

Foram encontrados resultados semelhantes na composição dos gases gerados em estudo de Manios *et al.* (2007) sobre compostagem em leiras revolvidas com 1,2 m de altura e 2,0 m de largura. No referido estudo, valores foram determinados valores médios de 18,07 % de O₂, 2,38 % de CO₂ e 0,04 % de CH₄ durante 97 dias.

Há uma maior probabilidade da produção de CH₄ no início do processo devido ao maior consumo do oxigênio disponível por parte dos microrganismos (BECK-FRIIS *et al.*, 2000). Fukumoto *et al.* (2003) constataram que as emissões de metano variam de acordo com as dimensões das leiras de compostagem. No referido estudo, a geração de metano sofreu uma elevação de 1,0 para 1,9 g CH₄/ kg matéria orgânica, para leiras com 321,1 e 778,9 kg de resíduos, respectivamente. Emissões de GEE em CO₂ equivalente foram mensurados durante 85 dias em proporção de 0,14, 0,24 e 0,59 para leiras estáticas com aeração forçada, leiras estáticas com aeração passiva e leiras revolvidas, respectivamente, em estudo sobre compostagem de dejetos de suínos e serragem realizado por Park *et al.* (2011).

Tais resultados indicam que apesar da falta de revolvimento o fornecimento de oxigênio com aeração passiva foi eficiente para as condições propostas. A concentração de O₂ está em conformidade com valores de temperatura encontrados para a leira EP100, pois caso o suprimento de oxigênio não seja satisfatório o processo se torna anaeróbio e a leira não aquece.

Figura 36 – Leitura de composição gases na leira EP100



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

5.8 Balanço de massa

Em relação à produção do composto, são observadas as reduções de massa das leiras indicadas na Tabela 4. As análises foram realizadas em base seca e úmida. Não houve medição final das leiras montadas em camadas. Tais dados são de grande relevância em particular para o dimensionamento do pátio de compostagem e planejamento financeiro com estimativa da quantidade de composto gerado.

Tabela 4 - Balanço de massa para leiras com mistura prévia

Leira	Base Seca			Base Úmida		
	Início (Kg)	Final (Kg)	Redução (%)	Início (Kg)	Final (Kg)	Redução (%)
EP100	488	76	84,43	916	325	64,52
EP75	342	72	78,95	587	299	49,06
EP50	269	53	80,30	534	222	58,43
RP100	407	89	78,13	710	340	52,11
RP75	228	56	75,44	619	261	57,84
RP50	200	36	82,00	372	142	61,83

Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

EP50: Leira estática formada com mistura prévia com altura de 0,50 m; EP75: Leira estática formada com mistura prévia com altura de 0,75 m; EP100: Leira estática formada com mistura prévia com altura de 0,50 m; RP50: Leira revolvida formada com mistura prévia com altura de 1,00 m; RP75: Leira revolvida formada com mistura prévia com altura de 0,75 m; RP100: Leira revolvida formada com mistura prévia com altura de 1,00 m.

Pode ser verificado que o método de compostagem com as condições abordadas reduz consideravelmente a quantidade em massa dos materiais após o tratamento dos resíduos. Em relação à perda de massa em base úmida, os valores variam entre 49,06 e 64,52%. Inácio e Miller (2009) comentam que uma redução entre 40 a 80 % ocorre no processo, devido à intensa perda de vapor d'água e carbono na forma de dióxido de carbono para a atmosfera.

Em relação à diminuição de massa com base seca, a redução aumenta devido à grande quantidade de umidade presente nas leiras no final do processo, em razão, tanto das chuvas intensas, quanto da maior capacidade de retenção de água do composto produzido.

Reduções de massa com base seca na faixa de 63,36 % a 73,27 % foram observados por Karnchanawong e Nissaikla (2014) em compostagem doméstica com aeração passiva de restos alimentares e folhas secas. Ao realizar compostagem de podas trituradas misturadas com restos de alimentos, Freitas (2016) encontrou uma redução média de 84,51 % de massa com base seca após 300 dias.

Em trabalho executado por Zhu *et al.* (2004), que compararam métodos de compostagem com aeração forçada, aeração passiva e com revolvimento, foi constatado que após 50 dias houve redução da massa em 61,88 %, 48,07 % e 50,53 %, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

Devido ao maior contato entre os resíduos as leiras montadas com mistura prévia obtiveram média das temperaturas 4,02 °C acima das leiras formadas em camadas, além de se manterem na fase termofílica por tempo mais prolongado. Quando comparados os métodos de operação, as leiras com revolvimento aqueceram em média apenas 0,14 °C a mais que as leiras estáticas. Os valores médios das temperaturas foram diretamente proporcionais às alturas empregadas com maiores valores para 1,00 m e menores para 0,50 m. A leira EP100 foi a única que esteve de acordo com os requisitos de higienização estabelecidos pela Resolução n° 481 do CONAMA para todas profundidades analisadas.

A forma e frequência das irrigações não foram adequadas para a manutenção da umidade na faixa considerada ideal pela literatura. Todas as leiras em algum momento estiveram abaixo de 40 %, o que pode reduzir a atividade biológica da biota. No final do processo houve forte intensidade de chuvas, o que acarretou nas leiras valores de umidade acima do limite recomendado pela IN 25/2009do MAPA, impossibilitando a comercialização do composto.

O pH subiu após cerca de 8 dias e permaneceu variando entre 7,0 e 8,5 ao longo processo. Com exceção da RP50, as demais leiras apresentaram no final do processo valores acima de 6,5 definidos com limite inferior pela IN 25/2009do MAPA.

Devido à heterogeneidade das podas e dos alimentos que tinham composições variadas não foi possível iniciar o processo com relações C/N próximas de um valor fixo. Apesar disso todas as leiras apresentaram decaimento durante o processo de compostagem devido à perda de carbono na forma de gás até valores em torno de 10/1. A partir do dia 45 as leiras apresentaram relações C/N dentro do limite de 20/1 como exige a IN 25/2009 do MAPA.

Quanto a condutividade elétrica do composto final produzido, foi constatado valor máximo de 1,70 mS/cm para a leira EP100. Valor este que esteve abaixo do limite de concentração de sais de 4 mS/cm estipulado pela literatura como máximo para prejudicar o crescimento das plantas. Já quanto ao Índice de Germinação, as leiras estáticas montadas em camadas (ECs) apresentaram valores abaixo de 60, o que demonstra moderado grau de fitotoxicidade para as plantas.

A concentração de gás oxigênio medida no interior da leira EP100 durante a fase de degradação ativa se manteve acima de 15 %, comprovando que apesar da falta de revolvimento o processo foi aeróbio. Tal dado corrobora com os valores encontrados para temperatura, visto que a leira EP100 manteve temperaturas mais altas durante o processo, indicando suprimento estável de O₂ para os microrganismos. A não detecção de metano durante o monitoramento dos gases aponta que houve uma redução da emissão de gases de efeito estufa.

A redução da massa dos resíduos durante o tratamento das leiras com mistura prévia foi de pelo menos 75 % com base seca e 49 % com base úmida.

Diante dos resultados apresentados, fica evidente a eficiência da compostagem dos resíduos analisados em leiras estáticas com aeração passiva com altura de 1,00 m, largura de 1,80 m. Com exceção da umidade, a leira EP100 esteve dentro dos valores ideais considerados por resolução, instruções normativas e literatura. Tal método, indicado para pequenas comunidades, permite simplificação da operação e redução de custos pela não necessidade de utilização de máquinas para revolvimento.

7 RECOMENDAÇÕES

Recomendam-se melhorias na forma de irrigação das leiras para a manutenção da umidade acima de 40 %, propiciando as condições ideais para o crescimento de bactérias, fungos e actinomicetos envolvidos no processo;

Recomenda-se a realização de teste com maiores alturas de leiras estáticas para permitir avaliar o comportamento do processo de compostagem até atingir o limite de 70 °C. Deve ser analisada a elevação da temperatura para que permaneça dentro dos limites tolerados pelos microrganismos;

É recomendável estudar a introdução de minhocas conhecidas como californianas ou africanas após a fase de degradação ativa, com a redução da temperatura para valores próximos ao ambiente. A vermicompostagem permite a produção de composto orgânico de melhor qualidade;

Recomenda-se a análise dos custos de implementação e operação de pátio de compostagem em leiras estáticas com aeração passiva com o intuito de execução em escala real.

Recomenda-se desenvolver uma linha de aplicação dos insumos produzidos pela compostagem em especial na produção hortaliças orgânicas;

Recomenda-se a operação das leiras em pátio de compostagem com estrutura coberta para evitar o excesso de umidade em épocas com altos índices pluviométricos.

A análise de ciclo de vida do processo é recomendada.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. J. **Gestão comunitária de resíduos orgânicos: o caso do Projeto Revolução dos Baldinhos (PRB), Capital Social e Agricultura Urbana.** 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agrossistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- ALVARENGA, P. *et al.* Evaluation of chemical land ecotoxicological characteristics of biodegradable organic residues for application to agricultural land. **Environment International**, Seattle, v. 33, n. 4, p.505-513, maio 2007.
- ALVES, M. G.; UENO, M. Identificação de fontes de geração de resíduos sólidos em uma unidade de alimentação e nutrição. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 10, n. 4, p.874-888, out. 2015.
- ANDERSEN, J. K. *et al.* Mass balances and life cycle inventory of home composting of organic waste. **Waste Management**, v. 31, n. 9, p.1934-1942, set. 2011.
- ANDRADE, F. C. *et al.* Treatment of organic solid waste generated at agricultural research corporation via composting under natural and controlled conditions. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 40, p.1-9, 2018.
- ANDREOLI, C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Curitiba: Prosab, 2001.
- ANTONIO, N. W.; DAMIÃO, C. D. Variação da temperatura na compostagem de resíduos sólidos orgânicos. **Universidade Federal do Espírito Santo**, Vitória, Es, p.1-8, out. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016.** São Paulo, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007 Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BARREIRA, L. P. **Avaliação das usinas de compostagem do Estado de São Paulo em função da qualidade dos compostos e processos de produção.** 204 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BARREIRA, L. P.; PHILIPPI JUNIOR, A.; RODRIGUES, M. S. Composting plants of São Paulo State: compost quality and production processes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p.385-393, out. 2006.
- BARROS, R. T. V.. **Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos.** Belo Horizonte: Tessitura, 2012.
- BECKETT, P. H. T.; DAVIS, R. D. Upper Critical Levels of Toxic Elements in Plants. **The New Phytologist**, Oxford, v. 79, n. 1, p.95-106, jul. 1977.
- BECK-FRIIS, B. *et al.* Formation and Emission of N₂O and CH₄ from Compost Heaps of Organic Household Waster. **Environmental Monitoring And Assessment**, [s.l.], v. 62, n. 3, p.317-331. 2000. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1006245227491>.
- BELO, S. R. S. **Avaliação de fitotoxicidade através de *Lepidium sativum* no âmbito de processos de compostagem.** 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.
- BELTRAME, K. G. Compostagem de resíduos sólidos no Brasil: benefícios x problemas. In: FRICKE, Klaus *et al.* **Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos: transferência de**

experiência entre Alemanha e o Brasil. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Cap. 2. p. 499-530.

BERNAL, M.; ALBURQUERQUE, J.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 100, n. 22, p.5444-5453, nov. 2009. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>.

BRASIL. Decreto nº 4954, de 14 de janeiro de 2004. **Altera O Anexo Ao Decreto Nº 4.954, de 14 de Janeiro de 2004, Que Aprova O Regulamento da Lei no 6.894, de 16 de Dezembro de 1980, Que Dispõe Sobre A Inspeção e Fiscalização da Produção e do Comércio de Fertilizantes, Corretivos, Inoculantes, Ou Biofertilizantes, Remineralizadores e Substratos Para Plantas Destinados à Agricultura..** Brasília, 2004.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 27, de 5 de junho de 2006.** Brasília, 2006.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009.** Brasília, 2009.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 35, de 4 de julho de 2006.** Brasília, 2006.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016.** Brasília, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos.** Brasília : MAPA, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, 2 de agosto de 2010. **Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 2010.

BRASIL. Lei nº 6894, de 16 de dezembro de 1980. **Dispõe Sobre A Inspeção e A Fiscalização da Produção e do Comércio de Fertilizantes, Corretivos, Inoculantes, Estimulantes Ou Biofertilizantes, Remineralizadores e Substratos Para Plantas, Destinados à Agricultura, e Dá Outras Providências.** Brasília, 1980.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 481, de 3 de outubro de 2017. **Estabelece Critérios e Procedimentos Para Garantir O Controle e A Qualidade Ambiental do Processo de Compostagem de Resíduos Orgânicos, e Dá Outras Providências..** Brasília, 2017.

BREWER, L *et al.* Agricultural Composting and Water Quality. **OsuExtension**, Corvallis, p.1-29, jun. 2013

BUTTENBENDER, S. E. **Avaliação da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva realizada no município de Angelina/SC.** 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CEARÁ. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO CEARÁ. . **Plano Estadual de Resíduos Sólidos.** Fortaleza, 2015.

CESTONARO, T. **Variabilidade espacial e temporal nas características químicas do composto de resíduos alimentares produzido em escala comercial**. 2018. 231 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CORDEIRO, N. M. **Compostagem de resíduos verdes e avaliação da qualidade dos compostos obtidos - Caso de estudo da Algar S.A.** 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

DIAZ, L.; BERTOLDI, M.; BIDLINGMAIER, W. **Compost Science and Technology**. California: Elsevier Science, 2007. 380 p.

FAVERIAL, J.; SIERRA, J. Home composting of household biodegradable wastes under the tropical conditions of Guadeloupe (FrenchAntilles). **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 83, p.238-244, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.068>.

FERNANDES, P. A. L. **Estudo Comparativo e Avaliação de Diferentes Sistemas de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos**. 1999. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 1999.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C.P. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos**. Rio de Janeiro: Prosab, 1999.

FONSECA, J. P. Q. B. **Efeito da adição de borras de café sobre a compostagem de resíduos de Acaciadealbata L. (mimosa)**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrônômica, Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, Vila Real, 2012.

FREITAS, L. M. C. **Análise de materiais estruturantes e de recipientes usados para compostagem doméstica**. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

FRICKE, K.; PEREIRA, C. A Alemanha como protagonista do desenvolvimento socioambiental em gestão de resíduos. In: FRICKE, Klaus *et al.* **Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos: transferência de experiência entre Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Cap. 1. p. 17-20.

FUKUMOTO, Y. Patterns and quantities of NH₃, N₂O and CH₄ emissions during swine manure composting without forced aeration—effect of compost pile scale. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 89, n. 2, p.109-114, set. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524\(03\)00060-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-8524(03)00060-9).

GUERMANDI, J. I. **Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos dos fertilizantes orgânicos produzidos pelas técnicas de compostagem e vermicompostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada em estabelecimentos alimentícios de São Carlos/SP**. 2015. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. **WHAT A WASTE: A Global Review of Solid Waste Management**. Washington: Urban Development& Local Government Unit, 2012.

INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: Ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

JUCÁ, J. F. *et al.* **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jabotão do Guararapes: BNDES, CCS Gráfica Editora Ltda., 2014.

- KARNCHANAWONG, S.; NISSAIKLA, S. Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin. **International Journal Of Recycling Of Organic Waste In Agriculture**, [s.l.], v. 3, n. 4, p.113-119, 4 set. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40093-014-0072-0>.
- KEHRES, B.; THELEN-JUNGLING, M. Gestão de qualidade: Certificação de produtos para o emprego sustentável do composto orgânico. In: FRICKE, Klaus *et al.* **Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos: transferência de experiência entre Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Cap. 1. p. 187-199.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda., 1985.
- KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba: Gráfica e Editora Degaspari, 1998. 171 p.
- KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto**. 4. ed. Piracicaba, SP, 2004.
- KONG, D. *et al.* Evaluating greenhouse gas impacts of organic waste management options using life cycle assessment. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 30, n. 8, p.800-812, 15 maio 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x12440479>.
- LARNEY, F. J.; OLSON, A. F. Windrow temperatures and chemical properties during active and passive aeration composting of beef cattle feedlot manure. **Canadian Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 86, n. 5, p.783-797, nov. 2006. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.4141/s06-031>.
- LUNDIE, S.; PETERS, G. M.. Life cycle assessment of food waste management options. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.275-286, fev. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.020>.
- MANIOS, T. *et al.* Methane and carbon dioxide emission in a two-phase olive oil mill sludge windrow pile during composting. **Waste Management**, [s.l.], v. 27, n. 9, p.1092-1098, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.05.012>.
- 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, p.355-360, out. 2007.
- MARQUES, V. C. *et al.* Compostagem de resíduos orgânicos domiciliares e poda de árvores: parâmetros físico-químicos. In: Encontro nacional de estudantes de engenharia ambiental, 14., 2016, Brasília. **Anais...** . Brasília, 2016.
- MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**. 2008. 204 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- MELO, W.J.*et al.* Uso de resíduos em hortaliças e impacto ambiental. **Horticultura Brasileira**, v. 18, p.67-82. 2000.
- OGUNWANDE, G. Review Article: Feasibility study of a V-shapedpipe for passive aeration composting. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 29, n. 3, p.240-248, 18 maio 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x10371493>

- OLIVEIRA, J. N. **Compostagem e vermicompostagem de bagaço de cana-de-açúcar da produção de cachaça de alambique, Salinas-MG**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2010.
- PARK, K. *et al.* Low greenhouse gas emissions during composting of solid swine manure. **Animal Feed Science And Technology**, [s.l.], v. 166-167, p.550-556, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.078>.
- PEREIRA, A. P.; GONÇALVES, M. M. Compostagem doméstica de resíduos alimentares. **Revista Científica do Unifae**, São João da Boa Vista, v. 5, n. 2, p.12-17, out. 2011.
- PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem: Processo de baixo custo**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2014
- PEREIRA NETO, J.T.; LELIS, M.P.N. Importância da umidade na compostagem: uma contribuição ao estado da arte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 1691-1698.
- RASAPOOR, M.; ADL, M.; POURAZIZ, B. Comparative evaluation of aeration methods for municipal solid waste composting from the perspective of resource management: A practical case study in Tehran, Iran. **Journal Of Environmental Management**, New York, v. 184, p.538-534, 2016.
- REIS, M. F. P. **Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 239 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídrico e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M.R. **Resíduos Sólidos: Problema ou Oportunidade?**. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.
- RISSE, M.; FAUCETTE, Britt. Food Waste Composting: Institutional and Industrial Applications. **Cooperative Extension Service**, Athens, p.1-12, jan. 2009.
- RUSSO, M. A. T. **Tratamento de resíduos sólidos**. 2003. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.
- SAER, A. *et al.* Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 52, p.234-244, ago. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.022>.
- SÁNCHEZ, A. *et al.* Greenhouse gas emissions from organic waste composting. **Environmental Chemistry Letters**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.223-238, 26 maio 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>.
- SANTOS, J. L. D. **Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis**. 2007. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa, 2009.

SIQUEIRA, T. M.O.; ASSAD, M. L. R. C. L. Compostagem de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo (BRASIL). **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 18, n. 4, p.243-264, out. 2015.

TEIXEIRA, L. B. *et al.* Processo de Compostagem, a Partir de Lixo Orgânico Urbano, em Leira Estática com Ventilação Natural. **Circular Técnica**, Belém, n. 33, p.1-8, out. 2004.

TRAUTMANN, N. M.; KRASNY, M. E. **Composting in the Class room**: Scientific Inquiry for High School Students. Ithaca: Cornell University, 1997.

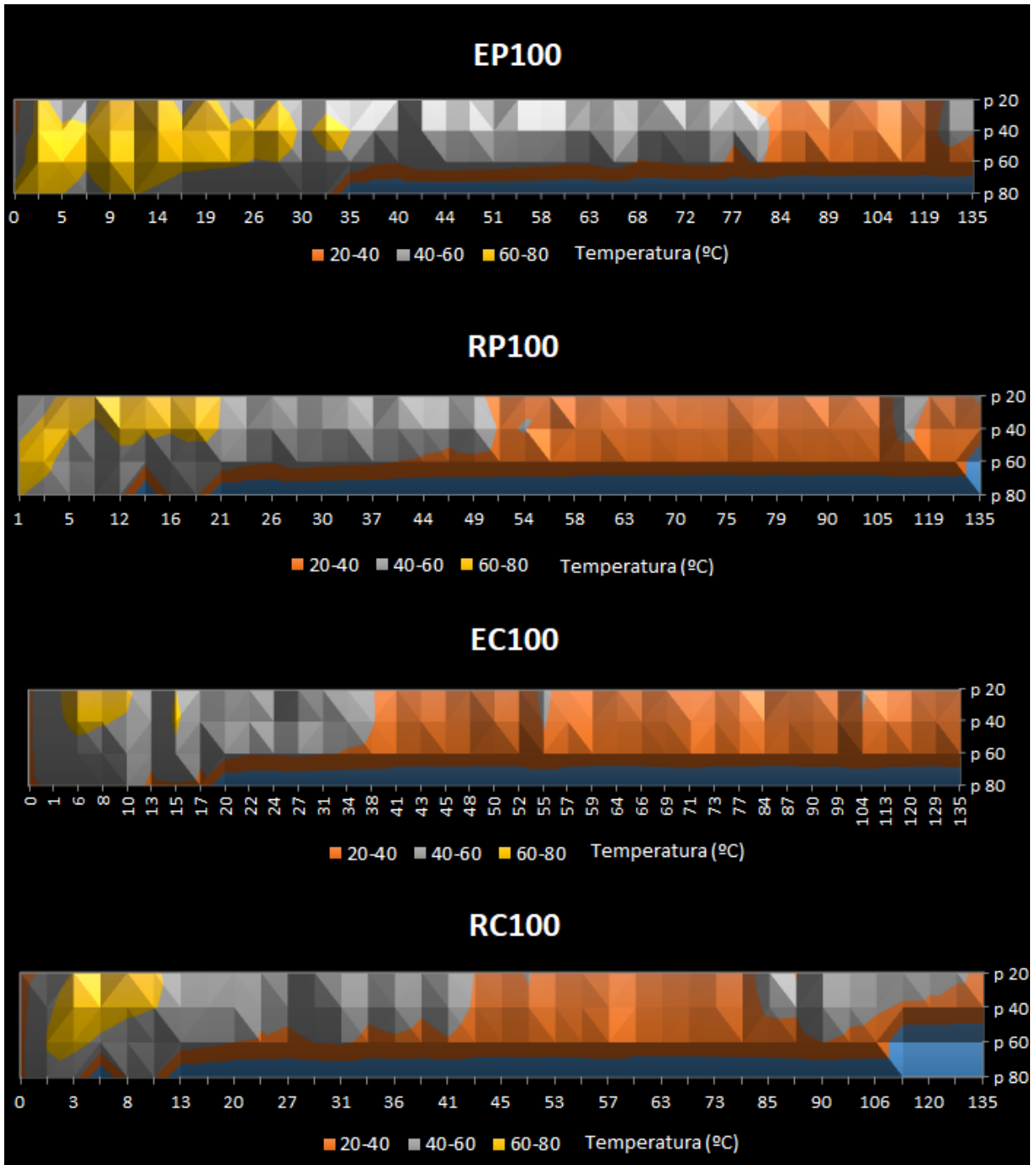
VALENTE, B. S. *et al.* Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, Cordoba, p.59-85. 2009.

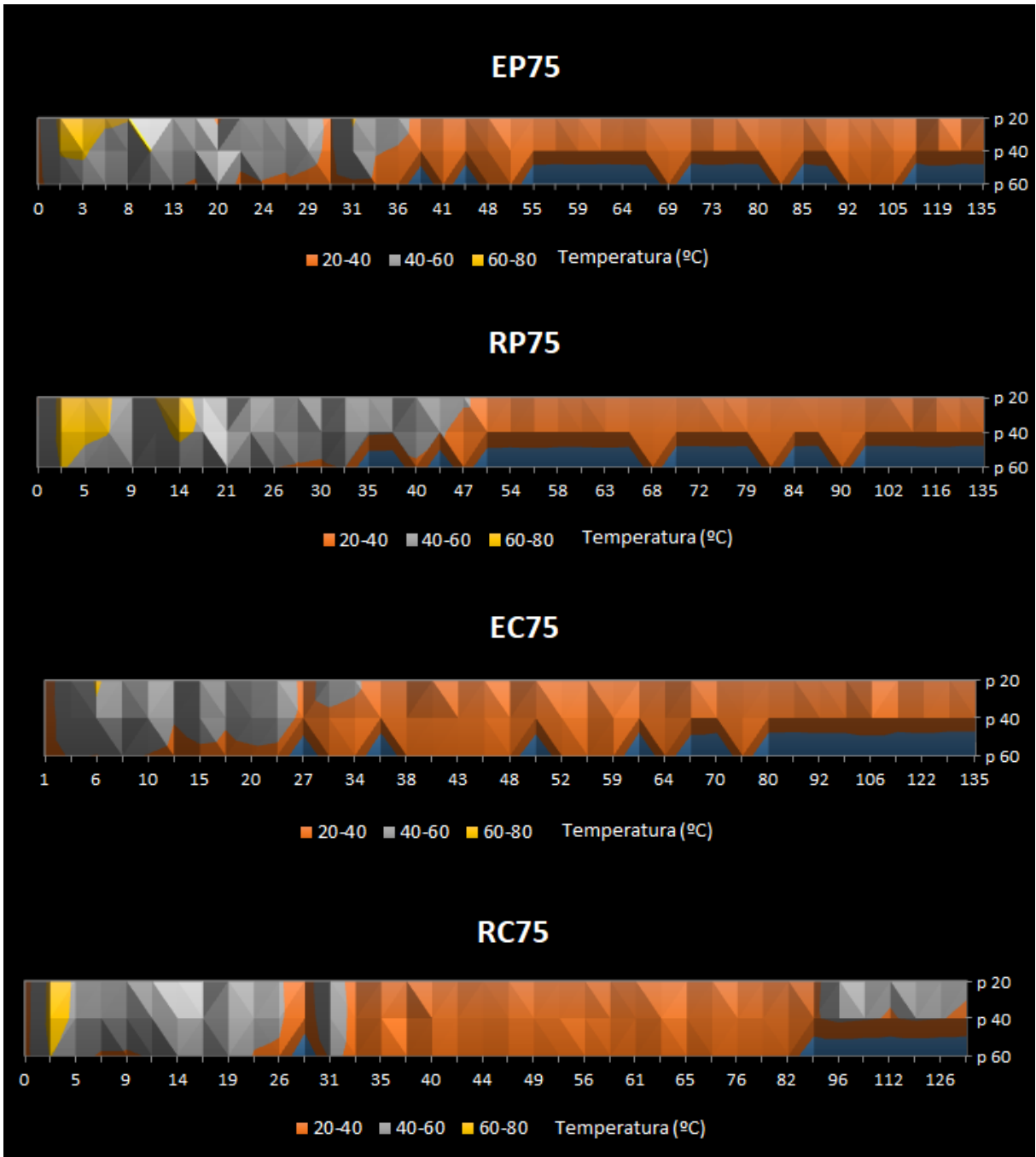
ZHU, N. *et al.* Performance characteristics of three aeration systems in the swine manure composting. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 95, n. 3, p.319-326, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.021>.

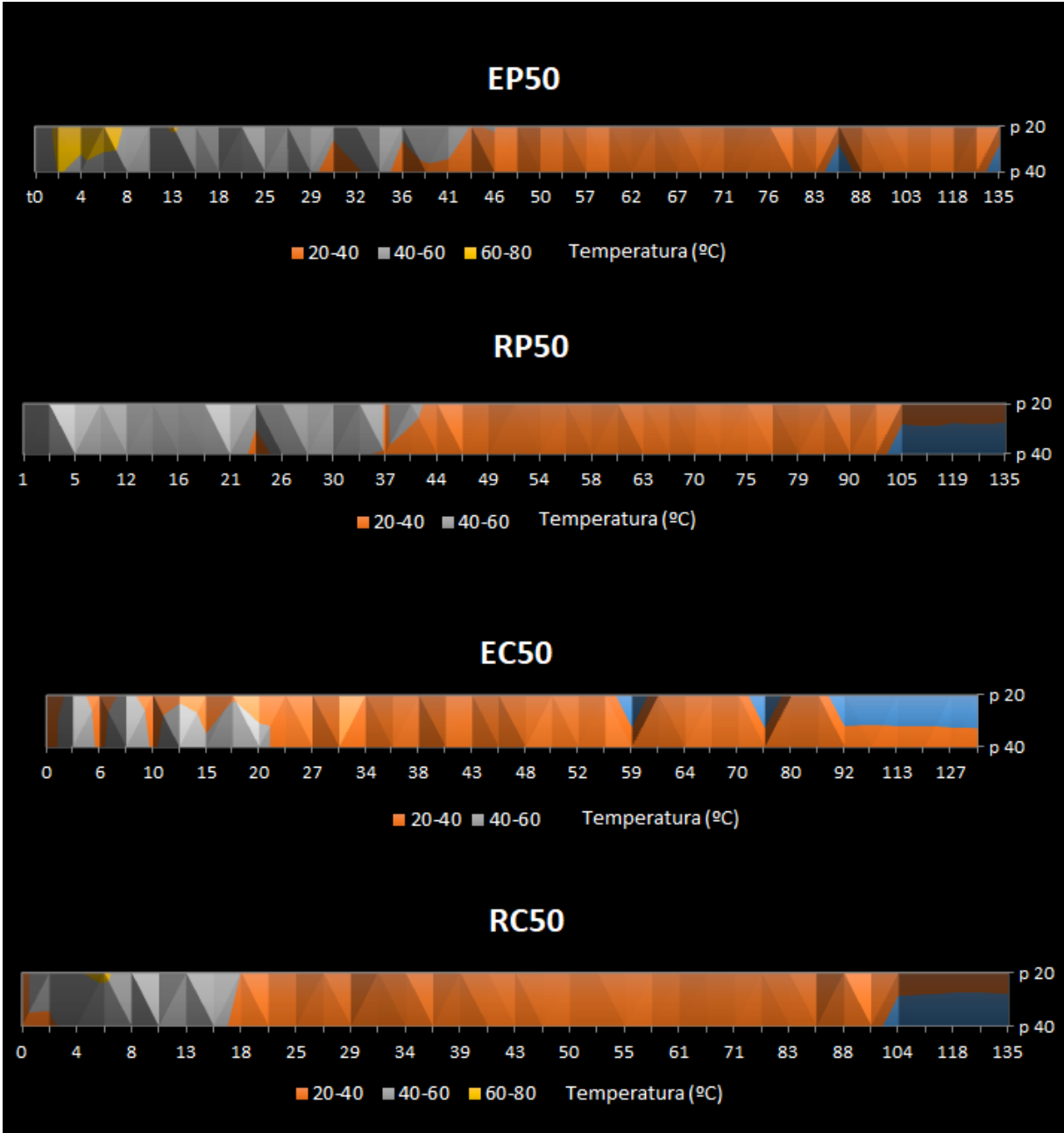
ZUCCONI, F. *et al.* Evaluating toxicity in immature compost. **Biocycle**, 22, p. 54-57, 1981.

ZURBRÜGG, C. *et al.* Decentralised composting in Dhaka, Bangladesh Production of compost and its marketing. In: ISWA 2002 ANNUAL CONGRESS,2002, Istanbul. **Anais...**

APÊNDICE A – ESTRATIFICAÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO PERFIL VERTICAL







APÊNDICE B – MONITORAMENTO TEMPERATURA

RC100	80	36,2	56,25	50,5			40,7	41																													
	60	35,8	61,15	64,2	57,2	51,25	49	52	46	39	36	40	43	36	38	36	39	34	34	35	34	35	38	33	33	33	34	34	35	37	40	38	37,15				
	40	33,25	57,6	67,25	67,45	63,8	60	58	55	49	42	44	50	53	44	47	42	45	39	38	40	36	36	38	34	35	36	38	36	42	41	49	43	40,75	39,3	39,25	36,6
20	31,4	45,15	62,4	60,5	68,3	61	57	53	45	46	56	55	46	49	45	47	40	39	40	37	38	37	35	35	37	39	37	44	40	50	44	42,15	43	41,25	41,55	38,05	
p/t	0	1	3	6	8	10	13	17	20	24	27	29	31	34	36	38	41	43	45	50	52	55	57	59	63	70	73	76	85	87	90	99	106	115	120	127	135

EC100	80	36,95	42,8	44,4	43,85	49,9	37	38	37																															
	60	37,05	50	55,3	54	55,35	43	58	43	48	42	42	45	41	39	38	34	33	33	33	33	33	39	34	32	32	33	34	36	32	34	32	32	34,35	33,2	38,1	34,35	33,75	32,8	34,6
	40	36,15	56,5	63,55	60,7	58,9	50	62	50	50	45	42	45	43	44	41	35	36	35	35	38	36	40	37	33	33	34	34	36	34	34	32	34	35,4	36,2	39,85	37,85	35,65	36,95	36,7
20	35,85	57,45	65,9	63,35	62,6	51	60	53	54	50	43	50	47	45	40	36	36	35	37	38	37	41	38	31	34	33	36	35	34	34	30	34	35,55	34,8	40,4	36,5	35,45	36,45	38,3	
p/t	0	1	6	8	10	13	15	17	20	22	24	27	31	34	38	41	43	45	48	50	52	55	57	59	64	66	69	71	73	77	84	87	90	99	104	113	120	129	135	

RP100	80	61	55,65	48,05	47,15	47,1			44	45																																	
	60	62,75	64,35	53,45	52,35	57,2	44	54	53	54	45	41	50	47	44	44	40	38	37	38	37	36	38	35	33	34	34	34	34	33	33	34	33	33	34	33	33	34	33	33	36,6	35,85	35,7
	40	58	62,05	61,9	57,9	62,8	63	61	64	60	51	53	53	55	54	48	49	46	43	46	39	40	35	38	37	36	33	36	35	35	37	36	36,75	36,3	35,6	42,7	35,7	36,1	35,85				
20	50,5	57,05	63,25	64,3	60,85	63	60	62	60	48	52	51	55	55	44	50	44	42	44	34	39	39	36	38	36	35	34	35	35	35	35	36	34,65	37,1	34,85	44,05	39,8	37,85	40,9				
p/t	1	2	5	7	12	14	16	19	21	23	26	28	30	33	37	40	44	47	49	51	54	56	58	61	63	65	70	72	75	77	79	83	90	96	105	110	119	126	135				

EP100	80	63,25	64,25	60,35	56,8	60,6	61	57	52	50	49	47	44	45	51																												
	60	53,85	67,6	65,25	61,1	65,8	64	68	64	63	62	59	60	56	59	59	44	41	53	55	53	52	49	47	43	43	50	40	40	44	45	37	42	35,65	34,55	36,4	35,2	35,15	35,85	33,85	37,2	35,05	
	40	35,8	66,65	62,55	61,1	64,45	63	69	64	63	62	64	66	59	62	60	58	51	60	57	57	53	54	51	49	49	51	46	47	48	50	43	42	37,9	36,7	35,75	36,15	36,45	34,2	36,65	43,2	40,6	
20	31,25	65,35	51,9	56	62,7	63	68	55	65	55	52	60	55	52	60	55	58	55	53	50	58	54	46	50	47	45	46	48	42	45	43	46	41	38	36,95	36,55	32,5	35,4	34,95	32,6	34,2	41,45	41,5
p/t	0	2	5	7	9	12	14	16	19	21	26	28	30	33	35	37	40	42	44	47	51	54	58	61	63	65	68	70	72	75	77	79	84	86	89	97	104	110	119	124	135		

RC75	h/0	34,1	60,95	45,7	38	38	41	48	43	47	40	39	45	35	37	34	38	36	36	36	35	35	34	35	35	36	34	36	35	34	34								
	h/40	32,8	65,55	58,05	54,15	49,85	51	50	46	48	43	41	33	49	35	34	38	37	38	38	37	36	34	34	36	39	35	37	37	36	38	44,6	41,9	38,85	42,6	40,4	38,15		
	h/20	32,1	65,2	58,75	58,95	57,1	52	48	41	49	41	41	35	50	33	38	37	36	37	39	39	37	36	34	36	36	35	37	35	36	38	45,95	41,3	42,9	41,55	42,1	41,95		
	p/t	0	2	5	7	9	12	14	16	19	23	26	30	31	33	35	37	40	42	44	47	49	51	56	58	61	63	65	69	76	79	82	91	96	105	112	121	126	135

EC75	h/80	31,45	41,95	39,3	44,3	39,05	33	37	36	38	37	35	34	31	32	33	33	32	33	32	32	32	34	33	33	33	33	34	33	33	32	33	33	37,1	31,7	33	30,95	31,15		
	h/40	31,55	51,25	59,15	55,2	58,9	41	47	42	46	47	37	39	37	33	32	34	35	35	33	35	35	32	36	32	34	36	33	34	33	34	33	32	33	33	37,1	31,7	33	30,95	31,15
	h/20	30,6	53,9	60,7	57,55	60,05	44	54	47	50	51	37	44	42	33	33	39	35	37	33	37	35	32	32	33	34	39	34	35	35	35	35	34	37,3	33,35	34,65	33,75	33,4		
	p/t	0	3	6	8	10	13	15	17	20	24	27	31	34	36	38	41	43	45	48	50	52	57	59	62	64	66	70	77	80	83	92	97	106	113	122	127	135		

RP75	h/80	41,85	61	57,3	50,05	43,25	46	52	45	57	41	40	39	38	41	39	35	39	35	35	35	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33			
	h/40	39,55	65,4	61,65	60,35	47,85	55	64	57	53	54	48	44	45	50	44	42	43	41	37	37	36	37	35	35	36	35	35	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34		
	h/20	38,3	65,9	63,5	61,45	51,5	61	66	55	43	55	50	51	47	53	47	44	50	43	41	37	37	39	37	37	36	36	35	36	35	36	35	34	34	34,3	33,9	33,95	34,5	36,4	35	36,35	36,05	35,4
	p/t	0	2	5	7	9	12	14	19	21	23	26	28	30	33	35	37	40	44	47	51	54	56	58	61	63	65	68	70	72	77	79	82	84	86	90	97	102	111	116	125	135	

EP75	h/80	34,3	53,4	55,45	51,1	49,05	49	41	39	51	37	40	39	37	34	38	37	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36					
	h/40	36,05	61,15	61,8	55,4	54,95	61	48	47	47	45	43	42	44	37	54	41	39	36	37	34	37	37	35	33	34	33	34	35	34	32	34	32	35,3	32,65	32,45	35,4	33,15	33	34,05	31,7	35,65	32,6	33,3		
	h/20	37,45	64,45	61,5	62,2	60,65	55	53	49	38	50	47	45	43	38	62	43	43	37	38	35	37	36	35	35	34	35	36	34	35	34	35	34	33,1	32,75	33,1	34,3	33,65	33,1	33,15	33,1	33,15	32,3	38,15	39,2	37,4
	p/t	0	1	3	6	8	10	13	15	20	22	24	27	29	30	31	34	36	38	41	45	48	52	55	57	59	62	64	66	69	71	73	78	80	83	85	87	92	99	105	114	119	128	135		

80	
60	
RC50	38 37,55 45,3 45,45 41,95 47 42 44 37 34 33 34 33 34 35 34 34 35 33 34 32 33 33 32 32 33 34 34 34 34 36 34
40	37,6 46,15 59,2 63,45 50 46 50 43 40 34 33 36 34 39 39 35 37 36 34 34 33 33 32 32 34 34 34 35 34 40 34 34,9 33,5 32 31,9 32,85
20	
p/t	0 1 4 6 8 11 13 15 18 22 25 27 29 32 34 36 39 41 43 48 50 53 55 57 61 68 71 74 83 85 88 97 104 113 118 125 135

80	
60	
EC50	32,825 50,25 37,8 48,7 38,8 46 41 42 42 37 36 38 33 34 33 36 33 34 34 36 35 34 34 32 33 34 33 32 32 31 32 33 33 34 33,25 33,4 32 31,4
40	32,225 43,6 35,9 42 36,95 39 37 40 38 37 35 35 33 33 33 34 33 34 34 34 34 33 33 33 33 32 32 31 31 32
20	
p/t	0 3 6 8 10 13 15 17 20 24 27 31 34 36 38 41 43 45 48 50 52 57 59 62 64 66 70 77 80 83 92 97 106 113 122 135

80	
60	
RP50	49,7 55,75 58,7 48,1 43,4 43 44 45 46 44 43 45 40 40 40 38 35 34 34 34 35 34 35 34 34 34 35 34 33 32 34 34 34 34,65 34,75
40	51,7 58,1 52,2 51,95 43,95 45 45 46 44 43 45 43 43 45 40 42 38 34 34 36 36 36 36 36 35 34 35 34 34 32 34 35 34 35,75 33,5 35,55 32,65 33,6 31,9
20	
p/t	1 2 5 7 12 14 16 19 21 23 26 28 30 33 37 40 44 47 49 51 54 56 58 61 63 65 70 72 75 77 79 83 90 96 105 110 119 126 135

80	
60	
EP50	39 60,8 57,7 54,25 53,6 45 46 45 44 45 45 41 43 35 39 45 35 39 39 35 38 34 36 34 35 32 33 33 34 34 33 34 34 32,7 31,8 32,7 32,55 32,9 32,6 32,9 32,15 34,1
40	40,8 66,75 63,6 67,4 58,55 52 62 54 51 54 48 49 48 42 47 48 42 43 44 40 40 37 38 37 36 34 35 36 37 36 36 37 37 33,15 33,65 32,05 34,5 34,3 33,5 33,8 33 35,9 32,8
20	
p/t	0 1 4 6 8 11 13 15 18 20 25 27 29 30 32 34 36 39 41 43 46 48 50 53 57 60 62 64 67 69 71 74 76 78 83 85 88 96 103 109 118 123 135