

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SEDE RODRIGO FACIO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Tesis de grado

**CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE Y
APROVECHAMIENTO DEL CALOR GENERADO EN UN
REACTOR BAJO AIREACIÓN FORZADA**

Trabajo final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Agrícola

Diego Fallas Conejo

Setiembre, 2016

Este trabajo final de graduación tesis fue sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.

Diego Alberto Fallas Conejo
Estudiante

Dra. Kattia Solís Ramírez
Directora, Equipo Asesor

M.Sc. Edwin Solórzano Campos
Presidente, Tribunal Examinador

Ing. Geovanni Carmona Villalobos
Miembro, Equipo Asesor

Dr. Pedro Casanova Treto
Miembro, Equipo Asesor

Ing. Hubert Morris Grainger
Miembro, Tribunal Examinador

Agradecimientos

Deseo expresar mi gratitud a Dios por permitirme culminar esta etapa. A mis padres por el apoyo y la confianza depositada durante mi formación académica. Juanca, Quirós y Roy gracias por hacer de este proceso una gran experiencia.

Índice General

Índice de cuadros.....	vii
Índice de figuras	xii
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Planteamiento del problema	1
Objetivo General	3
Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1 Residuos agrícolas	4
1.2 Proceso de compostaje.....	4
1.3 Factores del proceso de compostaje	7
1.3.1 Relación carbono: nitrógeno	7
1.3.2 Tamaño de partícula.....	7
1.3.3 Contenido de humedad	8
1.3.4 Potencial de hidrogeniones (pH).....	8
1.3.5 Oxígeno.....	9
1.4 Materia orgánica.....	10
1.4.1 Pulpa de café	10
1.4.2 Agentes de enmienda y volumen	12
1.5 Transferencia de calor.....	12
1.5.1 Psicrometría del aire	13
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA	19

2.1	Materiales del reactor	19
2.1.1	Recipiente	19
2.1.2	Piso falso.....	20
2.1.3	Accesorios.....	20
2.1.4	Ventilador	21
2.1.5	Fuente de poder.....	22
2.1.6	Material aislante.....	23
2.2	Armado del reactor	23
2.2.1	Recipiente	23
2.2.2	Ventilador	23
2.2.3	Manifold.....	24
2.3	Materia orgánica.....	25
2.3.1	Contenido de humedad	25
2.3.2	Relación carbono: nitrógeno	26
2.3.3	Porcentaje de materia orgánica	26
2.3.4	Agente de volumen	26
2.4	Mezcla de materia orgánica a procesar	27
2.4.1	Contenido de humedad y relación C/N de la mezcla.....	28
2.4.2	Aireación de la mezcla.....	29
2.5	Medición de factores y recopilación de datos.....	30
2.5.1	Velocidad del flujo de aire.....	30
2.5.2	Concentración de oxígeno	31
2.5.3	Temperatura	32
2.6	Razón de transferencia de calor	33
2.7	Pruebas preliminares	33
2.7.1	Pulpa de café con alto contenido de humedad	33
2.7.2	Pulpa de café a un contenido de humedad del 50%.....	34

2.7.3	Mezcla de pulpa de café y borucha de madera	37
2.7.4	Mezcla de borucha de madera y pulpa de café a una tasa de aireación de 2,5 y 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	39
2.8	Prueba 1, pulpa de café y borucha de madera a 2,2 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹ ..	41
2.9	Prueba 2, pulpa de café y borucha de madera a 2,2 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹ ...	43
2.10	Análisis estadístico.....	44
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		46
3.1	Caracterización de la materia orgánica.....	46
3.2	Pruebas preliminares	48
3.2.1	Pulpa de café a tres tasas de aireación	48
3.2.2	Pulpa de café a un contenido de humedad del 50 %.....	51
3.2.3	Mezcla de pulpa de café y borucha de madera a 0,18, 0,44 y 0,70 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	52
3.2.4	Mezcla de borucha y pulpa de café a una tasa de aireación de 2,5 y 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	58
3.3	Calibración de los equipos de registro de datos de temperatura y humedad relativa	60
3.4	Mezcla de pulpa de café y borucha de madera a 2,2 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹, prueba 1	62
3.4.1	Temperatura y % oxígeno en la mezcla.....	62
3.4.2	Diferencial de temperatura.....	65
3.4.3	Razón de transferencia de calor	69
3.5	Mezcla de pulpa de café y “borucha” de madera a 2,2 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹, prueba 2.....	71
3.5.1	Temperatura y % oxígeno en la mezcla.....	71
3.5.2	Diferencial de temperatura.....	74
3.5.3	Razón de transferencia de calor	76

3.6	Análisis comparativo	78
3.6.1	Temperatura de la materia orgánica.....	78
3.6.2	Concentración de oxígeno	79
3.6.3	Razón de Transferencia de calor.....	79
3.7	Análisis estadístico.....	80
3.7.1	Temperatura de la materia orgánica.....	80
3.7.2	Concentración de oxígeno	81
CONCLUSIONES.....		83
RECOMENDACIONES.....		84
REFERENCIAS.....		85
ANEXOS.....		89

Índice de cuadros

Cuadro 1.1. Tamaño recomendado de partículas.	8
Cuadro 1.2. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1 kg de café cereza.	11
Cuadro 1.3. Análisis físico y químico de pulpa de café con y sin mucílago en diferentes etapas del compostaje.	11
Cuadro 1.4. Propiedades del agua saturada.	14
Cuadro 1.5. Propiedades del aire a 1 atm.	18
Cuadro 2.1. Resumen de tubería y accesorios requeridos para el reactor.	21
Cuadro 2.2. Velocidad del flujo para pulpa de café a tres tasas de aireación.	34
Cuadro 2.3. Contenido de humedad de la pulpa luego de ser secada al sol.	35
Cuadro 2.4. Masa de agua a agregar a la materia orgánica para un contenido de humedad del 50 %.	36
Cuadro 2.5. Velocidad del flujo para pulpa al 50%.	36
Cuadro 2.6. Contenido de humedad de la borucha y la pulpa de café para prueba a 0,18, 0,44 y 0,70 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	37
Cuadro 2.7. Relación C/N de la mezcla para tres tasas de aireación.	38
Cuadro 2.8. Contenido de humedad de la mezcla de pulpa de café y borucha para tres tasas de aireación.	38
Cuadro 2.9. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a tasas de aireación de 0,18, 0,44 y 0,7 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	39

Cuadro 2.10. Contenido de humedad de la borucha y la pulpa de café para prueba a 2,2 y 2,5 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	40
Cuadro 2.11. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a tasa de aireación de 2,5 y 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	40
Cuadro 2.12. Contenido de humedad para la broza y la borucha de madera a 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹ , prueba 1.....	41
Cuadro 2.13. Relación C/N de la mezcla para prueba 1 a 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	42
Cuadro 2.14. Contenido de humedad de la mezcla para prueba 1 a 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	42
Cuadro 2.15. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a una tasa de aireación de 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹ , prueba 1.	42
Cuadro 2.16. Contenido de humedad para la broza y la borucha a una tasa de aireación de 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹ , prueba 2.....	43
Cuadro 2.17. Relación C/N de la mezcla para prueba 2 a 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	43
Cuadro 2.18. Contenido de humedad de la mezcla para prueba 2 a 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	44
Cuadro 2.19. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a una tasa de aireación de 2,2 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹ , prueba 2.	44
Cuadro 3.1. Contenido de humedad inicial de la broza de café y borucha de madera.	46
Cuadro 3.2. Análisis químico de abonos orgánicos.	47
Cuadro 3.3. Temperatura de la materia orgánica y % de oxígeno a una tasa de 0,18 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹ , recipiente 2.	48

Cuadro 3.4. Temperatura de la materia orgánica y % de oxígeno a una tasa de 0,44 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹ , recipiente 1.	49
Cuadro 3.5. Temperatura de la materia orgánica y el porcentaje de oxígeno a una tasa de 0,7 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹ , recipiente 3.	49
Cuadro 3.6. Temperatura de la materia orgánica a un contenido de humedad del 50 % y % de oxígeno del recipiente 1 a una tasa de 0,18 l min ⁻¹ l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	51
Cuadro 3.7. Temperatura de la materia orgánica a un contenido de humedad del 50 % y % de oxígeno del recipiente 3 a una tasa de 0,44 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	51
Cuadro 3.8. Temperatura de la materia orgánica a un contenido de humedad del 50 % y % de oxígeno del recipiente 2 a una tasa de 0,70 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	52
Cuadro 3.9. Temperatura de la materia orgánica y concentración de oxígeno para la mezcla de borucha y broza de café a una tasa de 0,18 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	53
Cuadro 3.10. Temperatura de la materia orgánica y concentración de oxígeno para la mezcla de borucha y broza de café a una tasa de 0,44 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	53
Cuadro 3.11. Temperatura la materia orgánica y concentración de oxígeno para la mezcla de borucha y broza de café a una tasa de 0,70 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	54
Cuadro 3.12. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de 0,18 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	56
Cuadro 3.13. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de 0,44 l min ⁻¹ kg _{materia seca} ⁻¹	57

Cuadro 3.14. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$	57
Cuadro 3.15. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, recipiente 1.....	58
Cuadro 3.16. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,5 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, recipiente 2.....	59
Cuadro 3.17. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$	59
Cuadro 3.18. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $2,5 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$	60
Cuadro 3.19. Ecuación de ajuste para cada medidor de temperatura utilizado.....	61
Cuadro 3.20. Ecuación de ajuste para humedad relativa.....	61
Cuadro 3.21. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1 recipiente 1.....	62
Cuadro 3.22. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1 recipiente 2.....	63
Cuadro 3.23. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1 recipiente 3.....	63
Cuadro 3.24. Diferencial de temperatura promedio diario ($^{\circ}\text{C}$) para los reactores 1, 2 y 3 a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.....	68

Cuadro 3.25. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2 recipiente 1.....	71
Cuadro 3.26. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2 recipiente 2.....	72
Cuadro 3.27. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2 recipiente 3.....	72
Cuadro 3.28. Diferencial de temperatura promedio diario para los reactores 1, 2 y 3 a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.....	76
Cuadro 3.29. Test de Tukey para la temperatura en los puntos de medición en la prueba 1.	80
Cuadro 3.30. Test de Tukey para la temperatura en los puntos de medición en la prueba 2.	80
Cuadro 3.31. Test de Tukey para la temperatura en los reactores en la prueba 1.....	81
Cuadro 3.32. Test de Tukey para la temperatura en los reactores en la prueba 2.....	81
Cuadro 3.33. Test de Tukey para la temperatura en los reactores entre prueba 1 y 2.....	81
Cuadro 3.34. Test de Tukey para la concentración de oxígeno en los reactores, prueba 1.	82
Cuadro 3.35. Test de Tukey para la concentración de oxígeno en los reactores, prueba 2.	82
Cuadro 3.36. Test de Tukey para la concentración de oxígeno en los reactores, prueba 1 y 2.....	82
Cuadro 4.1 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 1, prueba 1.....	89
Cuadro 4.2 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 2, prueba 1.....	91
Cuadro 4.3 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 3, prueba 1.....	93

Cuadro 4.4 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 1, prueba 2.....	95
Cuadro 4.5 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 3, prueba 2.....	97

Índice de figuras

Figura 1.1. Evolución de la temperatura (-) y el pH (--) durante el proceso de compostaje.	6
Figura 2.1. Recipiente plástico de 16 galones; Dprom= 37,1 cm y h= 56 cm.....	19
Figura 2.2. Piso falso en el reactor	20
Figura 2.3. Ventilador centrífugo.	22
Figura 2.4. Fuente de poder utilizada en el experimento.....	22
Figura 2.5. Configuración utilizada.....	24
Figura 2.6. Borucha de madera.....	27
Figura 2.7. Mezcla de borucha de madera y pulpa de café.....	28
Figura 3.1. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo.....	50
Figura 3.2. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo para una mezcla de borucha y pulpa de café.	55
Figura 3.3. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo para la prueba 1 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$	64
Figura 3.4. Oxígeno contra el tiempo para prueba 1 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$	65
Figura 3.5. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.....	66

Figura 3.6. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 2 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.....	67
Figura 3.7. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.....	67
Figura 3.8. Razón de transferencia de calor al aire en el reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.....	69
Figura 3.9. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 2 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.....	70
Figura 3.10. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.....	70
Figura 3.11. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo para la prueba 2 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$	73
Figura 3.12. Oxígeno contra el tiempo para prueba 2 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$	73
Figura 3.13. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.....	74
Figura 3.14. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.....	75
Figura 3.15. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.....	77
Figura 3.16. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.....	77

RESUMEN

La pulpa o broza de café es uno de los principales residuos agroindustriales en Costa Rica y en los distintos países productores. Este residuo generalmente se utiliza para la creación de abono orgánico mediante un proceso de compostaje o se seca para utilizarlo como materia para alimentar hornos en industrias. En Costa Rica el sistema más utilizado para realizar el proceso de compostaje es mediante pilas horizontales que son volteadas cada cierto tiempo manualmente o utilizando algún equipo mecánico.

El compostaje es un proceso aeróbico por lo que los microorganismos que descomponen la materia requieren de oxígeno. Estos microorganismos al respirar liberan calor que generalmente se disipa en el aire y se pierde pudiéndose utilizar para algún proceso. Esta investigación se centra en la caracterización del proceso de compostaje de la broza de café y la determinación de la razón de transferencia de calor entre la materia orgánica y el aire que la atraviesa en un sistema tipo reactor con aireación forzada.

Entre los principales factores que afectan el proceso de compostaje se encuentran la temperatura, la concentración de oxígeno, la relación C/N, el tamaño de partícula y el contenido de humedad. Se construyó un sistema de compostaje tipo reactor para evaluar estos factores y mantenerlos en los rangos recomendados para el proceso de compostaje. Se evaluaron tres tasas de aireación recomendadas por la literatura ($0,18, 0,44, 0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$) obteniendo una concentración de oxígeno pobre ($< 10 \%$) en la materia orgánica. Se evaluó una tasa de aireación mayor de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ que mantuvo a lo largo del experimento una concentración de oxígeno mayor al 10% y llevó la materia orgánica hasta una fase termófila ($> 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$). La razón de transferencia de calor para la tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ se mantuvo en un rango entre 6 y 30 kJ/h con algunos picos obtenidos cuando la temperatura del aire ambiente aumentaba, siendo el más alto de 50,20 kJ/h.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

El aprovechamiento de los residuos urbanos, agrarios e industriales sólidos y líquidos, de naturaleza orgánica fermentable, o biorresiduos, como se empiezan a denominar, puede suponer una considerable fuente de energía, agua, materia orgánica, fertilizantes, oligoelementos, bacterias beneficiosas y recursos en general para la agricultura, sin embargo su utilización debe ser cuidadosamente estudiada para aplicar técnicas que faciliten el aprovechamiento de la materia orgánica, evitando la contaminación del medio natural y de los cultivos (Cuadros, 2007).

La industria agrícola invierte gran cantidad de dinero en la adquisición de energía eléctrica y combustibles fósiles con el fin de transformarlos en energía térmica para diferentes procesos a los que se someten sus productos. Generalmente los fluidos (agua y aire) que se exponen a esta energía térmica no requieren alcanzar temperaturas mayores a 70 °C, sin embargo la energía requerida para llevarlos a esta temperatura es alta y costosa.

Procesos como el secado de productos agrícolas, tratamientos térmicos, limpieza de instalaciones y calefacción para invernaderos representan aplicaciones en el sector que requieren gran cantidad de energía térmica para ser llevadas a cabo. Por lo tanto, existe la necesidad de explorar nuevas fuentes de energía con el fin de abaratar costos en la producción y poder ser más competitivos.

Uno de los problemas ambientales de la agricultura son los residuos orgánicos que se generan (restos de poda, de cosecha, de post-cosecha, estiércol, pasto, fruta caída, entre otros). Normalmente, debido al desconocimiento, a la falta de un espacio adecuado, o al tiempo, las prácticas habituales con estos residuos son la quema, el enterramiento o el abandono del material a la intemperie hasta su pudrición (Román, Martínez, & Pantoja, 2013). Esta misma práctica se observa en la mayor cantidad de hogares costarricenses, donde la eliminación de residuos orgánicos se realiza por medio de la basura común,

mezclándola con desechos no biodegradables, desaprovechando así los beneficios que podemos adquirir con un manejo adecuado.

El compostaje es un proceso aeróbico donde los materiales orgánicos son descompuestos biológicamente produciendo principalmente compost, dióxido de carbono, agua y calor. Este proceso abarca cuatro etapas microbiológicas principales relacionadas con la temperatura: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración, donde la estructura de la comunidad microbiana cambia y el producto final es compost (Haug, 1980). Este proceso ha sido utilizado a lo largo del tiempo por agricultores con el fin de mejorar la fertilidad del suelo, sin embargo hoy en día es utilizado para disminuir el volumen de desechos sólidos municipales, así como convertir estos desechos orgánicos en productos (Vining, 2002).

Utilizando el proceso de compostaje para el manejo de los desechos orgánicos, podemos obtener beneficios como el manejo de malos olores, adquisición de un producto estable para la fertilización de los campos y una fuente de energía térmica que podría utilizarse para distintos fines. Por esta razón resulta de suma importancia estudiar y determinar la capacidad de extracción de calor de un proceso de compostaje controlado.

Una desventaja del compostaje es el tiempo y espacio necesario para que los microorganismos descompongan el carbono, nitrógeno y resto de materia orgánica inicial; generen calor para eliminar patógenos y bacterias que pueden ser dañinas para el suelo, plantas y consumidores y por último, madure para poder ser agregado al suelo. Además, el proceso de compostaje requiere de mano de obra con el fin de mantener las condiciones adecuadas para el desarrollo de sus fases. Por estas razones es que muchos productores e instituciones no se interesan por desarrollar este proceso. Sin embargo, si existiese una tecnología con la cual se pueda obtener un valor agregado durante el periodo de descomposición, muchos productores verían desde otra perspectiva la aplicación del proceso de compostaje

Durante la fase termófila la temperatura de la biomasa puede superar los 70 °C sin necesidad de alguna actividad antropática (Román et al., 2013). Esta fase, de alta

temperatura, se puede mantener por un tiempo mayor a tres semanas dependiendo de las condiciones en que se desarrolle el proceso. Por lo tanto, la fase termófila convierte la materia orgánica en una fuente de calor de la cual podemos obtener beneficios.

Distintos autores han estudiado el balance de energía en el proceso de compostaje para diferentes materias orgánicas, sin embargo existe una gran variación entre sus resultados ya que dependen del tamaño de reactor, tasa de aireación y materia orgánica utilizada. A diferencia de los estudios previos, este experimento se centra en la medición de la tasa de calor neta entregada al aire que podemos obtener del proceso de compostaje sin alterar de manera drástica el sistema. Además, se pretende caracterizar y obtener la tasa aprovechable de calor entregada al aire que genera un residuo orgánico de la producción nacional, con el fin de determinar si existe la posibilidad de utilizar esa energía térmica en procesos que la requieran y poder proyectar los resultados hacia otros residuos orgánicos a los cuales no se les aprovecha correctamente.

Objetivos

Objetivo General

- Evaluar el proceso de compostaje de una materia orgánica bajo aireación forzada, con el fin de determinar la razón de transferencia de calor entregada al aire que pasa a través de la pila de compost.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir un sistema de compostaje tipo reactor con aireación forzada.
- Evaluar una tasa de aireación adecuada para el proceso.
- Determinar la tasa de calor entregada por la materia orgánica al aire para las condiciones seleccionadas.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Residuos agrícolas

Según Cuadros (2008) se entiende por residuo, de forma general, a un producto cuya característica fundamental es que no tiene valor ni estimación en las circunstancias en las que se genera y que se ha de retirar para facilitar o mejorar los procesos de producción o cultivo. Sztern & Pravia (1999) clasifican los residuos por la naturaleza química en inorgánicos y orgánicos. Los residuos inorgánicos son aquellos de origen mineral y sustancias o compuestos sintetizados por el hombre, mientras que los restos orgánicos tiene su origen en los seres vivos, incluyendo una gran diversidad de residuos que se originan como consecuencia de las funciones fisiológicas de mantenimiento y perpetuación o son producto de la explotación por el hombre de los recursos biológicos. Entre las fuentes de residuos orgánicos están: actividad agropecuaria, agroindustrial, industria láctea, frigorífica, cerealera, aceitera y granos oleaginosos, industria pesquera, forestal y residuos sólidos urbanos.

1.2 Proceso de compostaje

La degradación de los desechos orgánicos inicia prácticamente al momento en que los desechos son generados. Bajo condiciones naturales las lombrices, los nematodos y algunos insectos inician el rompimiento de la materia orgánica en partículas de menor tamaño con el fin de aumentar la exposición de estas a la degradación microbiana (Chen, de Haro Marti, Moore, & Falen, 2011). Bajo condiciones controladas, estas acciones son desarrolladas por operadores que muelen y cortan la materia orgánica de mayor tamaño.

El proceso por el cual se da la descomposición de materia orgánica hasta obtener un producto estable (compost) se puede dividir según su temperatura en cuatro fases:

Mesófila

Cuando las condiciones físicas son establecidas, los microorganismos colonizan la materia orgánica e inician el proceso de compostaje. Los organismos mesófilos, presentes

cuando el rango de temperatura es entre 24 °C y 40 °C, descomponen azúcar y almidón provocando un aumento en la temperatura (Chen et al., 2011).

El material primario comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (incluso en horas), la temperatura asciende hasta los 45 °C. Este aumento es debido a que los microorganismos utilizan las fuentes sencillas de C y N generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos que pueden bajar el pH hasta cerca de 4,0 ó 4,5 (Román et al., 2013).

Termófila

Una vez que el material alcanza temperaturas mayores a 45 °C, los microorganismos mesófilos son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias, las cuales degradan las fuentes más complejas de carbono, como la celulosa y la lignina (Román et al., 2013). La temperatura del material aumenta rápidamente a temperaturas entre 65 °C y 70 °C en tiempos de 24 a 72 horas, y puede mantener esta temperatura por días o semanas dependiendo de las propiedades de la materia, el tamaño de la pila de compostaje y las condiciones ambientales (Chen et al., 2011). A esta fase se le llama activa debido a que se acelera el proceso de descomposición de la materia orgánica.

Los microorganismos de esta fase transforman el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio sube. Otro aspecto fundamental de esta fase es la destrucción de bacterias y patógenos debido a las altas temperaturas del material. El calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella spp*; además eliminan quistes, huevos de helminto, esporas de hongos y semillas de malezas (Román et al., 2013).

Enfriamiento o Mesófila II

Agotadas las fuentes de carbono y nitrógeno en el material de compostaje, la temperatura desciende hasta los 40-45°C. Continúa la degradación de polímeros y aparecen

algunos hongos. Los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, manteniéndose ligeramente alcalino.

Maduración

Esta etapa puede abarcar de 1 a 4 meses, y tiene como fin curar el compost inmaduro. Un compost inmaduro puede contener altos niveles de ácidos orgánicos, alta relación carbono-nitrógeno, valores extremos de pH, alto contenido de sales; cualquiera de estos estados puede dañar o matar a las plantas si se aplica al suelo en este estado (Chen et al., 2011). En la figura 1.1 se describen las fases térmicas del proceso.

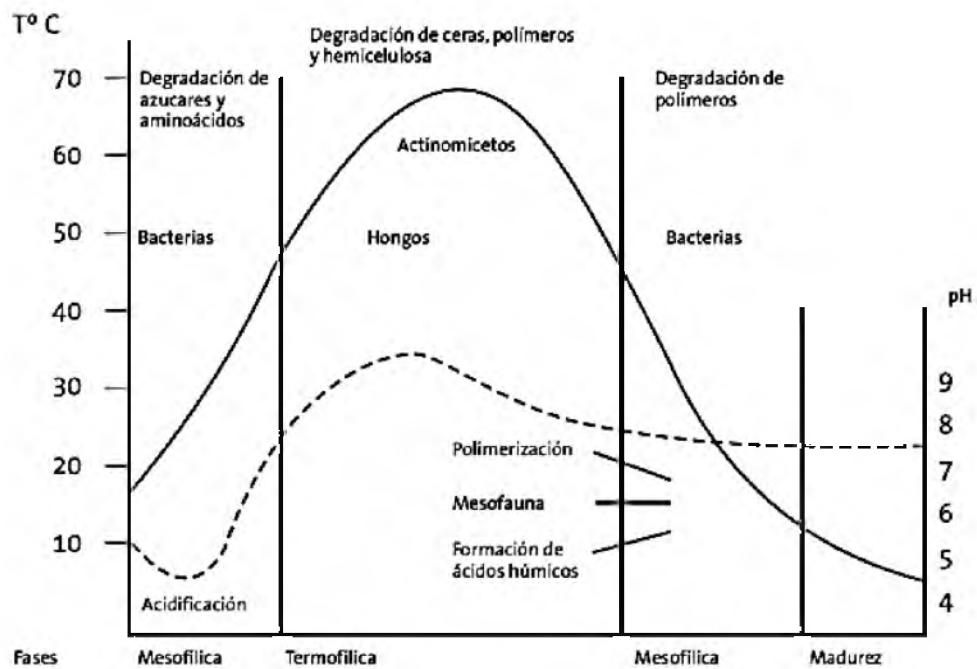


Figura 1.1. Evolución de la temperatura (-) y el pH (--) durante el proceso de compostaje.

Fuente: Laos (2003).

Por la evolución de la temperatura se puede juzgar la eficiencia y el grado de estabilización a que ha llegado el proceso, ya que existe una relación directa entre la temperatura y la magnitud de la degradación de la materia orgánica. Asimismo, existe una relación directa entre la degradación y el tiempo durante el cual la temperatura ha sido alta.

A veces la temperatura puede llegar a ser tan alta que inhibe el crecimiento de los propios microorganismos, conociéndose este fenómeno como suicidio microbiano (Moreno Casco & Moral Herrero, 2008).

1.3 Factores del proceso de compostaje

Existen diversos factores que afectan el desarrollo y reproducción de los microorganismos en el proceso de compostaje. El manejo de estas variables permite la aceleración del proceso, así como la modificación de este para distintos objetivos; los factores principales del proceso de compostaje son:

1.3.1 Relación carbono: nitrógeno

La relación carbono: nitrógeno es uno de los factores más importantes a la hora de iniciar un proceso de compostaje. Esta relación viene dada por la materia orgánica inicial que utilizaremos en el sistema. Según Román et al. (2013) la relación varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, desde 35:1 a 15:1; asimismo acotan que si la relación es mayor a 35:1 existe un exceso de carbono y por ende el proceso tiende a enfriarse y a ralentizarse. Si la relación es menor a 15:1, en la mezcla hay una mayor cantidad de material rico en nitrógeno y por ende el proceso tiende a calentarse en exceso y se generan malos olores por el amoníaco liberado. Distintos autores recomiendan rangos de trabajo, tal como Chen et al. (2011) mencionan que el rango “ideal” para el proceso es de 25 a 35:1, siendo 30:1 la más adecuada. Cornell Composting (2007) recomienda una relación C/N de 30/1.

1.3.2 Tamaño de partícula

La actividad microbiana ocurre en la interface entre la superficie de la partícula de material orgánico y el aire; por lo tanto aumentar el área superficial de la partícula permitirá a los microorganismos digerir mayor cantidad de material, acelerar su multiplicación y generar más calor (British Columbia Ministry of Agriculture and Food,

1996). En el cuadro 1.1 se aprecian los problemas a los que se incurren si el tamaño de partícula no se encuentra en el rango recomendado.

Cuadro 1.1. Tamaño recomendado de partículas.

Tamaño de las partículas (cm)		Problema	Soluciones
> 30 cm	Exceso de aireación	Los materiales de gran tamaño crean canales de aireación que hacen bajar la temperatura y desaceleran el proceso	Picar el material hasta conseguir un tamaño medio de 10-20 cm
5 - 30 cm Rango ideal			
< 5 cm	Compactación	las partículas demasiado finas crean poros pequeños que se llenan de agua, facilitando la compactación del material y un flujo restringido de aire, produciéndose anaerobiosis	Volear y/o añadir material de tamaño mayor y volteos para homogenizar

Fuente: Román et al. (2013).

1.3.3 Contenido de humedad

La humedad es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular (Román et al., 2013).

Un contenido de humedad en el material entre 40 y 60 por ciento provee un adecuado ambiente para los microorganismos. Si el contenido de humedad es menor al 40%, la actividad microbiana va a disminuir; por lo contrario si supera el 60 %, los nutrientes se lixivian, la porosidad disminuye y se producen malos olores debido a las condiciones anaerobias (British Columbia Ministry of Agriculture and Food, 1996).

1.3.4 Potencial de hidrogeniones (pH)

El pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso, este va desde 4,5 a 8,5; siendo el rango ideal de 5,8 a 7,2 (Román et al., 2013). Un

rango inadecuado de pH en el proceso del compostaje causaría problemas en el crecimiento y actividad de los microorganismos. Los principales microorganismos presentes en el proceso son las bacterias y hongos, siendo los rangos de pH adecuados de las bacterias entre 5,5 y 8,0; mientras los hongos se desarrollan adecuadamente entre 6,0 y 7,5 (Chen et al., 2011).

1.3.5 Oxígeno

El oxígeno es esencial para el metabolismo y respiración de los microorganismos aerobios, además permite oxidar las moléculas orgánicas. Al inicio del proceso de compostaje la concentración de oxígeno en los poros ronda entre 15 y 20 % (similar a la composición normal del aire) y la concentración de dióxido de carbono varía entre 0,5-5 %. Conforme la actividad biológica progresa, la concentración de oxígeno decae mientras la de dióxido de carbono aumenta (Cornell Composting, 2007). Debido a la disminución en la concentración de oxígeno, se vuelve indispensable la aireación de la materia orgánica con el fin de evitar un ambiente anaerobio. Según Chen et al. (2011) los microorganismos aerobios pueden sobrevivir a una concentración de oxígeno de 5 %, sin embargo lo recomendado es mantener la pila de compost a más de 10 %.

Para sistemas con aireación forzada continua, diferentes autores experimentaron con tasas de ventilación para el compostaje de materias orgánicas. Por ejemplo, Kulcu & Yaldiz (2004) examinaron tasas entre 0,1-0,8 l min⁻¹ kg_{materia orgánica}⁻¹ en desechos de tomate, berenjena, pimienta y pasto; recomendando una tasa de 0,4 l min⁻¹ kg_{materia orgánica}⁻¹. Guo et al (2012) utilizaron tasas entre 0,24-0,72 l min⁻¹ kg_{materia seca}⁻¹ para el compostaje de cerdasa, recomendando 0,48 l min⁻¹ kg_{materia seca}⁻¹. Guardia, Petiot, & Rogeou (2008) experimentaron con tasas de aireación entre 1,69-16,63 l h⁻¹ kg_{materia seca}⁻¹ en el compostaje de desechos orgánicos; obteniendo temperaturas altas por más tiempo con tasas entre 3,25 y 8,48 l h⁻¹ kg_{materia seca}⁻¹. Rasapoor, Nasrabadi, Kamali, & Hoveidi (2009) utilizaron tasas de ventilación de 0,4, 0,6 y 0,9 l min⁻¹ kg_{materia orgánica}⁻¹, recomendado utilizar al inicio (primeras 9 semanas) 0,6 l min⁻¹ kg_{materia orgánica}⁻¹ y luego 0,4 l min⁻¹ kg_{materia orgánica}⁻¹. Algunos autores delimitan su tasa de aeración mediante la masa de sólidos volátiles (sv),

por ejemplo Arslan, Ünlü, & Topal (2011) realizaron experimentos utilizando 0,37, 0,49, 0,63, 0,74 y 0,99 $l \text{ min}^{-1} \text{ kg}_{\text{sv}}^{-1}$; obteniendo los mejores resultados para la tasa de 0,62 $l \text{ min}^{-1} \text{ kg}_{\text{sv}}^{-1}$.

1.4 Materia orgánica

1.4.1 Pulpa de café

La materia orgánica es sin duda el factor más determinante a la hora de iniciar una composta. Su estado determina factores como relación carbono: nitrógeno, contenido de humedad, pH y tamaño de partícula. Pese a que cualquiera de estos parámetros se puede modificar con la adición de otra materia, se debe evitar, ya que aumenta los costos de la preparación. Es por esto que se deben buscar materias primas que se acerquen a los rangos adecuados expuestos anteriormente.

La pulpa de café es el principal subproducto del procesamiento del fruto de café, y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58 % del peso del fruto fresco (cuadro 1.2) (Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010).

Para el proceso de compostaje, la broza de café presenta características idóneas que casi ningún otro residuo agroindustrial posee, ya que contiene un alto contenido de azúcares, una buena relación C: N (25-30:1) y un tamaño de partícula adecuado. El contenido de humedad puede ser muy alto, pero es rápidamente modificado con un frecuente volteo de material (Soto & Muñoz, 2002). En el cuadro 1.3 se muestran algunas características físicas y químicas de la pulpa de café.

Cuadro 1.2. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1 kg de café cereza.

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (g)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
	Película Plateada	22
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104
Pérdida acumulada (g)		924

Fuente: Calle (1977)

Cuadro 1.3. Análisis físico y químico de pulpa de café con y sin mucílago en diferentes etapas del compostaje.

	Pulpa de café sola			Pulpa de café con mucílago		
	Fresca	Dos meses con volteos	Compost	Fresca	Dos meses con volteos	Compost
Humedad (bh)	74,83	70	52,83	87,90	77,85	55,50
pH	4,40	8,90	8,32	4,13	8,58	7,95
MO %	93,34	81,41	54,44	92,70	85,33	79,36
C/N %	30,72	11,65	7,47	27,95	13,50	11,62
N%	1,76	4,06	4,24	1,94	3,70	3,98
P%	0,13	0,27	0,27	0,13	0,25	0,25
K%	2,82	6,90	5,27	2,75	4,82	4,10
Ca%	0,32	0,92	0,91	0,37	0,90	1,18
Mg %	0,08	0,19	0,19	0,11	0,20	0,26
Fe (ppm)	158,75	2510	3413,33	700	3230	3425
Mn (ppm)	69	100	155,17	43	128,75	169,25
Zn (ppm)	8,25	109,50	158,83	45,75	88,00	162,58
CU (ppm)	9,75	12	14,67	17,75	26,75	40,42
B (ppm)	21,75	61	65,33	18,75	52,25	64,33

Fuente: Soto & Muñoz (2002).

1.4.2 Agentes de enmienda y volumen

Según Haug (1980) la presencia de un alto contenido de agua en la materia a compostear resulta en una reducción en la temperatura de la materia y una operación ineficiente si la humedad no es controlada. Como una regla general, entre mayor sea el contenido de humedad de la materia orgánica, mayor es la necesidad de mantener un volumen vacío para garantizar una aireación adecuada. El principal problema de un alto contenido de humedad, la falta de porosidad y la tendencia a la compactación es una transferencia de oxígeno inadecuada a través de la materia. Para corregir esta situación se han utilizado tres métodos:

1. Mezcla de la materia a compostear con alguna fracción de un compost ya maduro.
2. Adición de una enmienda orgánica a la materia con alto contenido de humedad.
3. Adición de un agente de volumen.

Como agente de enmienda Haug (1980) se refiere a un material orgánico añadido al sustrato de alimentación principalmente para reducir el peso y aumentar los espacios de aire que permitan una correcta aireación. Las enmiendas también se pueden utilizar para aumentar la cantidad de compuestos orgánicos degradables en la mezcla. Algunos ejemplos de enmiendas incluyen a la paja, turba, cáscaras de arroz, aserrín, estiércol, residuos sólidos tales como basura, los recortes de césped, y una variedad de otros compuestos orgánicos de desecho. Asimismo la enmienda ideal debe ser seca, liviana y fácilmente degradable. Un agente de volumen es un material, orgánico o inorgánico, de suficiente tamaño para proveer un soporte estructural y mantener espacios de aire dentro de la pila de compostaje.

1.5 Transferencia de calor

Según Cengel (2007) el calor es la forma de la energía que se puede transmitir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se le llama razón de transferencia de calor, se denota por

\dot{Q} . Para el caso específico en el que el calor se transfiere a un flujo de aire, se puede obtener con la siguiente relación:

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_{salida} - h_{entrada}) \quad (1)$$

Donde:

\dot{Q} : Razón de transferencia de calor (kJ/s).

\dot{m} : Flujo másico (kg/s).

h_{salida} : Entalpía del aire en condiciones de salida (kJ/kg).

$h_{entrada}$: Entalpía del aire en condiciones de entrada (kJ/kg).

Al utilizar una mezcla de vapor de agua y aire seco, es necesario conocer y utilizar la psicrometría del aire para la determinación de la entalpía.

1.5.1 Psicrometría del aire

La psicrometría se define como “aquella rama de la física relacionada con la medición o determinación del aire atmosférico, particularmente respecto de la mezcla de aire seco y vapor de agua (Marques Pereira & Marcal de Queiroz, 1991). El aire está compuesto de varios componentes (oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, helio, etc.), que nunca condensan en las aplicaciones habituales. Además, el aire incluye vapor de agua que puede condensar al enfriarse, o que se puede añadir al aire por vaporización de agua o mezcla de vapor. Se pueden considerar todos los elementos no condensables como aire seco, y el vapor de agua como humedad (Gómez Acebo, 2004).

Entre las principales propiedades del aire húmedo se encuentran: Temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, temperatura del punto de rocío, presión de vapor, razón de humedad, humedad relativa, grado de saturación y volumen específico.

Según Gómez Acebo (2004) las propiedades se pueden obtener mediante:

Presión de saturación

El agua tiene, a cada temperatura, una presión en la que se produce el cambio de fase líquido-vapor. Su valor se puede leer en el cuadro 1.4, y este no cambia por el hecho de que el valor esté en mezcla con aire.

Cuadro 1.4. Propiedades del agua saturada.

Temp (°C)	Presión de saturación (kPa)	Densidad (kg/m ³)		Entalpía de vaporización (kJ/kg)	Calor específico (J/kg·K)	
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor
0,01	0,6113	999,8	0,0048	2501	4217	1854
5	0,8721	999,9	0,0068	2490	4205	1857
10	1,2276	999,7	0,0094	2478	4194	1862
15	1,7051	999,1	0,0128	2466	4186	1863
20	2,339	998,0	0,0173	2454	4182	1867
25	3,169	997,0	0,0231	2442	4180	1870
30	4,246	996,0	0,0304	2431	4178	1875
35	5,628	994,0	0,0397	2419	4178	1880
40	7,384	992,1	0,0512	2407	4179	1885
45	9,593	990,1	0,0655	2395	4180	1892

Fuente: Cengel (2007).

Humedad relativa

La humedad relativa (Φ) es la relación entre la presión de vapor y la presión de saturación a la misma temperatura. Suele expresarse en %:

$$\Phi = \frac{p_v}{p_s} \quad (2)$$

Donde:

p_v : presión de vapor (kPa).

p_s : presión de saturación (kPa).

Humedad absoluta

La humedad absoluta indica cuantos kilogramos de vapor de agua acompañan cada kilogramo de aire seco. Se relaciona con la presión de vapor como sigue:

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{P - p_s} \quad (3)$$

Donde:

P: presión atmosférica en (kPa).

p_v : presión de vapor (kPa).

p_s : presión de saturación (kPa).

ω : humedad absoluta (kg v/kg a.s)

Volumen específico del aire húmedo

$$v_h = \left(\frac{1}{29} + \frac{\omega}{18} \right) \frac{RT}{P} \quad (4)$$

Donde:

v_h : volumen específico del aire húmedo (m^3/kg a.s.)

ω : humedad absoluta (kg v/kg a.s)

P: presión atmosférica en (kPa).

T: Temperatura (K).

R: 8,3145 kJ/kmol K.

Densidad del aire húmedo

$$\rho = \frac{1 + \omega}{v_h} \quad (5)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire húmedo (kg a.h/m³)

ω : humedad absoluta (kg v/kg a.s)

Entalpía

La entalpía de una mezcla de aire seco y vapor de agua es la suma de las entalpías de cada uno de los componentes individuales. La entalpía del aire seco h_a se puede calcular como la entalpía de un gas ideal; la entalpía del vapor, leyendo en las tablas de vapor de agua. Sin embargo en psicrometría se suelen emplear expresiones sencillas suponiendo calores específicos constantes:

$$h_a = h_{a,ref} + c_{p,a}(T - T_{ref}) \quad (\text{aire seco}) \quad (6 \text{ a})$$

$$h_g = h_{g,ref} + c_{p,g}(T - T_{ref}) \quad (\text{vapor de agua}) \quad (6 \text{ b})$$

Suele tomarse como referencia:

$$T_{ref} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$h_{a,ref} = 0$$

$$h_{g,ref} = h_{fg0} = 2501 \text{ kJ/kg} \quad (\text{vapor de agua saturado a } T_{ref} \text{ entalpía de vaporización a } 0 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Además para intervalos pequeños de temperatura se puede tomar como constantes el calor específico del aire seco $c_{p,a} = 1,007 \text{ kJ/kg K}$ y el del vapor de agua $c_{p,v} = 1,85 \text{ kJ/kg K}$ (gases perfectos) (cuadros 1.4 y 1.5). Con ello:

$$h = 1,005(T) + \omega(2501 + 1,82(T)) \quad (7)$$

Donde:

h : entalpía del aire en kJ/kg.

ω : humedad absoluta.

T: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Cuadro 1.5. Propiedades del aire a 1 atm.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Densidad (kg/m^3)	Calor específico ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
15	1,225	1,007
20	1,204	1,007
25	1,284	1,007
30	1,164	1,007
35	1,145	1,007
40	1,127	1,007
45	1,109	1,007

Fuente: Cengel (2007).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales del reactor

2.1.1 Recipiente

Según Haug (1980) los sistemas de compostaje se pueden clasificar según dónde esté contenido el material orgánico, definiendo reactores y no reactores. Para este trabajo se utilizará un sistema de compostaje tipo reactor, ya que ofrece: un control sobre la aireación que estamos entregando al sistema, reducción en el espacio de trabajo, aislamiento físico entre la materia prima y el ambiente, y la facilidad del control y caracterización de los factores que rigen en el proceso de compostaje.

Para la realización del experimento se utilizan recipientes plásticos ya que aísla físicamente la materia orgánica del medio de manera inerte y económica. Se cuenta con tres recipientes con una capacidad individual de 16 galones (60,5 litros) con una altura de 0,56 m y 0,37 m de diámetro interno. El recipiente cuenta con una tapa y su respectiva cincha que ejerce presión y lo cierra herméticamente (figura 2.1).



Figura 2.1. Recipiente plástico de 16 galones; $D_{prom} = 37,1$ cm y $h = 56$ cm.

2.1.2 Piso falso

Con el fin de mantener una aireación uniforme sobre la columna de materia orgánica se agrega un piso falso en cada reactor, construido con malla metálica cuadrada de 5 mm de luz (mesh 4). Pese a que el tamaño de partícula recomendado es mayor a 5 cm, difícilmente el total de partículas que componen cierta materia orgánica o una mezcla de ellas serán del tamaño recomendado; por esta razón se selecciona una malla mesh 4 con el fin de evitar que pequeñas unidades caigan en la base del recipiente y por ende afecte la ventilación del sistema. Como se observa en la figura 2.2, el piso falso crea un espacio libre en la base del reactor que genera una uniformidad en el flujo de aire que atraviesa la materia orgánica.



Figura 2.2. Piso falso en el reactor

2.1.3 Accesorios

La tubería tiene la función de transportar el aire desde el ventilador hasta el reactor y luego evacuarlo; para esto se cuenta con tubería de PVC 1120 SDR 17 de 18 mm ($\frac{3}{4}$ " de diámetro nominal. Para controlar el flujo de aire que ingresa a cada reactor se utiliza una válvula de bola (llave de paso) de PVC 18 mm ($\frac{3}{4}$ " de diámetro nominal. El diseño del transporte de aire contempla la construcción de un "manifold" que distribuye el flujo de aire proveniente del ventilador a los distintos reactores, para esto es necesario contar con

dos “tee” y dos codos de PVC de 18 mm ($\frac{3}{4}$ ”) de diámetro nominal. Se selecciona una tubería de 18 mm ya que permite introducir transversalmente el sensor del anemómetro de hilo caliente completo para realizar mediciones adecuadas. Una tubería de menor diámetro no permite introducir el sensor completo y una tubería de mayor diámetro estaría sobredimensionada.

El ventilador con el que se cuenta posee una salida rectangular de 2,72 x 5,39 cm por lo que se le realizó una adaptación uniendo esta cavidad con un tubo sanitario de PVC 50 mm (2”) de diámetro nominal, con el fin de acoplarlo posteriormente a la tubería de 18 mm de PVC mediante una reducción. Los accesorios requeridos para la construcción del reactor se resumen en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Resumen de tubería y accesorios requeridos para el reactor.

Accesorio	Material	Diámetro Nominal (mm)	Cantidad
Tubo	PVC	18	1
Tubo	PVC	50	1
Codo	PVC	18	2
Tee	PVC	18	2
Válvula	PVC	18	3
Reducción	PVC	50-18	4

2.1.4 Ventilador

Con el fin de mantener aireada la materia orgánica se instaló un ventilador centrífugo para los tres reactores. Se cuenta con un ventilador DCFB Blower III de la marca Japan Servo (figura 2.3) con un caudal máximo de 0,65 m³/s y una presión máxima de 220 Pa con un voltaje de 12 V.



Figura 2.3. Ventilador centrífugo.

2.1.5 Fuente de poder

La fuente de poder o de alimentación es un dispositivo electrónico que convierte la energía eléctrica disponible (habitualmente corriente alterna) a la forma que requieran los diversos circuitos del sistema (habitualmente corriente continua) (Shurler, 1986). Para este caso se le solicita a la fuente de poder (figura 2.4) una tensión continua de 12 V para el funcionamiento del ventilador.



Figura 2.4. Fuente de poder utilizada en el experimento.

2.1.6 Material aislante

Tanto en el campo térmico como eléctrico no existen aislantes perfectos, sino cuerpos malos conductores del calor y capaces de frenar la intensidad de un flujo térmico. Un aislante térmico deberá ofrecer una buena resistencia a la transmisión del calor. Existen materiales con estructura reflectante compuestas generalmente por hojas de aluminio de pequeño espesor separadas por algún material aislante (Rougeron, 1977).

Con el fin de aislar la materia orgánica del ambiente, cada recipiente se encuentra forrado por un aislante térmico de poliéster de 5mm con caras reflectoras de aluminio.

2.2 Armado del reactor

2.2.1 Recipiente

Se procedió a realizar dos agujeros con una broca de 18 mm ($\frac{3}{4}$ " en donde se colocan tubos del mismo diámetro para la admisión y escape de aire. El agujero de salida de aire se realizó en la tapa superior del reactor, mientras que el agujero de ingreso se ubicó a 5 cm de la base del recipiente. Seguidamente se introduce un tubo de PVC 1120 de 18 mm de diámetro nominal y 12 cm de largo en cada orificio y se aplica un pegamento para sujetarlo; asimismo se coloca silicón alrededor con el fin de evitar fugas de aire.

Con el fin de medir la temperatura de la materia orgánica dentro del recipiente se procede a hacer 3 orificios a 17 cm (T3), 30 cm (T2) y 43 cm (T1) medidos desde la base del recipiente. Estos orificios se cubren con "tape" eléctrico con el fin de que no existan pérdidas de aire. Una vez seco el pegamento y el silicón, se forra todo el recipiente con el aislante térmico.

2.2.2 Ventilador

Como se mencionó anteriormente y se observó en la figura 2.3, el ventilador presenta una salida rectangular por lo que se debe de realizar una transición para acoplarlo a la tubería. Para esto se cortaron 25 cm de tubería de PVC de 50 mm (2") de diámetro nominal y se procedió a calentar una sección para darle forma rectangular. Una vez

obtenida una forma similar a la salida del ventilador, se adhirió la tubería al ventilador utilizando silicón con el fin de cubrir cualquier espacio por donde pueda escapar el aire. Por último se conecta el ventilador a la fuente de poder.

2.2.3 Manifold

El manifold permite la distribución del aire proveniente del ventilador hacia cada reactor. Está constituido por tubería, codos, tees y válvulas de bola de PVC de 18 mm. Para su construcción se procedió primeramente a colocar una reducción de 50 mm a 18 mm para acoplar las distintas tuberías; seguidamente se colocó un tubo de 18 mm de diámetro de 10 cm de longitud que conecta la reducción a la serie de tees. Las tees se colocan de tal manera que permitan el flujo de aire hacia los costados y el frente del sentido del flujo original. La configuración de las tees provoca que el flujo se seccione creando tres tuberías a las cuales llamaremos P1, P2 y P3 en orden de izquierda a derecha en dirección del flujo. Las tuberías P1 y P3 se extienden por 35 y 43 cm respectivamente en donde se coloca un codo de 90° que direcciona el flujo hacia el frente. Una vez que las tuberías están direccionadas hacia el frente se colocan las válvulas de bola que van a permitir regular el flujo de aire que ingresa al reactor (figura 2.5).



Figura 2.5. Configuración utilizada.

2.3 Materia orgánica

Para efectos de este experimento la broza o pulpa de café se adquirió en el Beneficio COOPELIBERTAD RL ubicado en Santo Domingo de Heredia a una altura de 1200 msnm. La materia se recolectó en el beneficio en horas de la mañana, cuando inician las labores de “chancado”, con el fin de obtener la broza lo más fresca posible. En el beneficio se utiliza un proceso de beneficiado húmedo. Seguidamente se procede a extraer una muestra para calcular el contenido de humedad y la relación C: N inicial.

2.3.1 Contenido de humedad

Para el cálculo del contenido de humedad inicial de la materia orgánica, se procede a pesar tres muestras del material para luego colocarlas en un horno a 105 °C por 24 horas; transcurrido este proceso se pesan de nuevo las muestras. El contenido de humedad de la muestra se obtiene:

$$m_{agua} = m_{total} - m_{seca} \quad (8)$$

Contenido de humedad en base húmeda:

$$H_{bh} = \frac{m_{agua}}{m_{total}} \times 100 \quad (9)$$

$$H_{bs} = \frac{m_{agua}}{m_{seca}} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

m_{agua} : masa de agua (g).

m_{seca} : masa (g) luego de secar la muestra.

m_{total} : es la masa (g) de la muestra antes del secado.

H_{bh} : es el contenido de humedad en base húmeda (%).

H_{bs} : es el contenido de humedad en base seca (%).

2.3.2 Relación carbono: nitrógeno

Las muestras secas se colocaron en recipientes sellados y etiquetados y se enviaron al Laboratorio de Suelos y Foliarés del Centro de Investigación Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, donde se le realizó un análisis de carbono: nitrógeno a cada muestra.

2.3.3 Porcentaje de materia orgánica

Según el Laboratorio de Suelos y Foliarés del CIA el % de carbono, determinado con un auto analizador de C/N, se correlaciona muy bien ($R^2 \geq 95$) con el porcentaje de materia orgánica (MO).

Por lo tanto se puede calcular el valor del porcentaje de MO mediante la siguiente relación:

$$\%MO = 1,43 * \%C \quad (11)$$

Donde:

% MO: porcentaje de materia orgánica presente en la muestra.

% C: porcentaje de carbono en la muestra.

2.3.4 Agente de volumen

Para la elaboración de este experimento se busca un material que pueda satisfacer los métodos 2 y 3 propuestos por Haug (1980). Se requiere de un material de enmienda que

regule el contenido de humedad de la materia orgánica, asimismo que no desestabilice la relación C/N de la pila de compostaje y que pueda satisfacer parcialmente las condiciones de un agente de volumen. Por estas razones se utiliza la borucha de madera que se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6. Borucha de madera.

La borucha de madera a diferencia del aserrín, presenta un tamaño de partícula mayor que le permite tener una mejor estructura física. Asimismo su volumen permite la creación de espacios vacíos dentro de la mezcla que aumentan la aireación de la misma. Este material es realmente liviano y presenta una alta relación C/N que nos permite llevar la mezcla a la relación C/N recomendada por la teoría.

Esta se acopia en el Aserradero de Moravia y se procede a realizar el mismo proceso de la broza para conocer el contenido de humedad y relación C/N presente.

2.4 Mezcla de materia orgánica a procesar

La materia con la que realizará la composta será una mezcla entre pulpa (broza) de café fresca y borucha de madera seca; la cantidad de materia a agregar depende de cuánto deseemos acercarnos a los valores recomendados de los diferentes factores antes

mencionados. Para efectos del experimento se utilizaran 18 kg de broza de café y 0,85 kg de borucha.

En primer lugar se pesan los 18 kg de broza fresca en una balanza digital marca Kilotech modelo KHS-200-30. La broza se vierte en un recipiente y se procede a pesar 0,85 kg de borucha la cual se vierte en el recipiente para mezclarlo con la broza (figura 2.7). Una vez mezclado se procede a llenar completamente el reactor.



Figura 2.7. Mezcla de borucha de madera y pulpa de café.

2.4.1 Contenido de humedad y relación C/N de la mezcla

La relación C/N y el contenido de humedad de la mezcla se calculan de la siguiente manera:

$$C/N_m = \frac{C/N_A \times M_A + C/N_B \times M_B}{M_A + M_B} \quad (12)$$

$$CH_m = \frac{CH_A \times M_A + CH_B \times M_B}{M_A + M_B} \quad (13)$$

Donde:

CH_m : contenido de humedad de la mezcla (%).

CH_A : contenido de humedad de la pulpa (%).

CH_B : contenido de humedad de la borucha (%).

M_A : masa total de la pulpa (kg).

M_B : masa total de borucha (kg).

C/N_A : relación carbono nitrógeno de la pulpa (%).

C/N_B : relación carbono nitrógeno de la borucha (%).

C/N_m : relación carbono nitrógeno de la mezcla (%).

2.4.2 Aireación de la mezcla

Para el experimento se trabajarían tres tasas recomendadas según la literatura consultada; $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ $0,1 \text{ min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$. Sin embargo en pruebas preliminares se constató que para el alto contenido de humedad y cantidad de material agregado, el porcentaje de oxígeno era menor al recomendado (menor al 10 %). Por lo tanto se prosiguió a realizar pruebas a diferentes tasas de aireación encontrando que a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ el porcentaje de oxígeno se encontraba en el rango adecuado.

2.5 Medición de factores y recopilación de datos

Para efectos de este experimento se analizaron los factores relacionados con contenido de humedad, temperatura de la mezcla, temperatura y humedad relativa del aire, concentración de oxígeno y velocidad del flujo de aire que ingresa al reactor. Para medir y mantener los factores en los rangos adecuados se utilizaron diferentes equipos que se describen a continuación:

2.5.1 Velocidad del flujo de aire

Para determinar y monitorear la tasa de aireación se contó con un anemómetro TSI VelociCalc 8345. La velocidad de flujo requerida para cumplir con las tasas de aireación propuestas se obtiene del siguiente análisis:

La tasa de aireación viene dada en $l \text{ min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, por lo tanto en primer lugar se debe obtener el caudal volumétrico para la mezcla de la broza mediante la siguiente ecuación 14:

$$Q = T_a \times m_s \quad (14)$$

Donde:

Q: Caudal (l/min).

T_a: Tasa de aireación ($l \text{ min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$).

m_s: masa seca de la mezcla (kg).

Seguidamente se obtiene la velocidad del flujo que ingresa a cada reactor mediante:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

Donde:

Q: Caudal (m^3/s) ($1 \text{ m}^3/\text{s} = 60000 \text{ l/min}$).

A: Área interna de la tubería (m^2).

Para corroborar el buen funcionamiento del anemómetro se procedió a compararlo con la velocidad del flujo de aire generado por el ventilador centrífugo a 12 voltios a través de la tubería de 50 mm. Se calculó la velocidad teórica a través de la tubería mediante la ecuación 15 utilizando el diámetro interno medido por un vernier electrónico; dando por resultado 4,07 m/s. El flujo teórico se obtuvo de las especificaciones técnicas del ventilador.

Para el cálculo de la velocidad teórica se utilizó la ecuación 15 donde:

$Q_{teórico}$: caudal especificado por el fabricante a 12 voltios (0,0108 m^3/s).

A: Área interna de la tubería de 50 mm (diámetro=60,63 mm) en m^2 .

La velocidad medida por el anemómetro de hilo caliente se realizó introduciendo el sensor por un agujero a 8 cm de la salida de la tubería, obteniendo un valor promedio de 4,03 m/s. Resultando en un porcentaje de error de 1,4% calculado mediante la ecuación 16.

$$\% \text{ error} = \frac{|V_{teórica} - V_{experimental}|}{V_{experimental}} * 100 \quad (16)$$

2.5.2 Concentración de oxígeno

La medición de la concentración de oxígeno presente en el reactor se realiza por medio de un analizador de gases marca Kane-May modelo KM900, el cual se calibra antes de iniciar el experimento. Para la recopilación de los datos primeramente se procede a introducir la sonda por la tubería de escape del reactor hasta el nivel donde se encuentra la materia orgánica (las pruebas siempre se realizan en el mismo punto) una vez al día. Obtenida la lectura se procede a anotar el valor en un cuadro de registro diario.

2.5.3 Temperatura

La temperatura es el único factor no controlado del experimento ya que deseamos encontrar la temperatura máxima que se da a lo largo de la etapa termofílica del proceso. Para efectos del experimento debemos conocer la temperatura con la que entra y sale el aire del reactor, con el fin de obtener el calor transmitido por la materia orgánica al aire. Así mismo la temperatura que alcanza la materia orgánica dentro del reactor es de suma importancia ya que junto con la tasa de aireación repercute directamente en la temperatura con que sale el aire del reactor.

La temperatura de la materia orgánica se mide introduciendo un termómetro digital Extech 39272 por los orificios T1, T2 y T3 de cada reactor con el fin de obtener la temperatura de la materia orgánica en tres puntos del reactor; la toma de datos se realiza una vez al día. La temperatura del aire se realiza de dos formas: 1. Se inserta el termómetro por la salida del reactor para obtener la temperatura del aire una vez al día; además se tomó la temperatura ambiente con el mismo instrumento. 2. Se coloca un registrador de temperatura HOBO U12-012 en la salida de cada reactor que mide y guarda el valor cada 15 minutos. Además se coloca un instrumento igual en la entrada del ventilador centrífugo para recopilar los datos de la temperatura ambiente. Cabe mencionar que los datos medidos por el termómetro Extech se validaron previamente con un termómetro de mercurio.

Para la validación de los registradores de datos se procede a someterlos bajo condiciones de temperatura y humedad relativa controladas, en sistemas de temperatura (horno y cámara de frío) y humedad relativa constantes (sales); junto a los sensores a utilizar se colocan dos sensores previamente calibrados que sirven como referencia para los otros sensores. Para la prueba de temperatura en específico el hobo U14 funciona como referencia y las pruebas se realizan a 58 °C, 38 °C, 22 °C y 5 °C. En el caso de la humedad relativa, los hobos se colocaron en desecadores con sales de Cloruro de Calcio (CaCl_2), Cloruro de sodio (NaCl) y Nitrato de potasio (KNO_3) a 20 grados, las cuales según Marques Pereira & Marcal de Queiroz (1991), presentan una humedad relativa de 32,3 %, 75,5 % y

93,2 % respectivamente. Las pruebas se realizaron en el Centro de Investigación de Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica.

2.6 Razón de transferencia de calor

La cuantificación de la razón de transferencia de calor entregada por la materia orgánica al aire se realizará utilizando la ecuación 1.

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_{salida} - h_{entrada})$$

2.7 Pruebas preliminares

Para determinar una tasa de aireación adecuada para el proceso se deben analizar varios factores como lo son la humedad, la materia seca, la porosidad y el oxígeno presente en el reactor. Se realizaron pruebas preliminares con el fin de determinar condiciones que sean adecuadas para un proceso eficiente de compostaje. Las pruebas se efectuaron utilizando broza de café en el estado que se recolecta en el beneficio (con alto contenido de humedad), broza de café con un contenido de humedad en base húmeda de 50 % y una mezcla de broza de café y borucha de madera, a tres tasas de aireación recomendadas por la literatura (0,18, 0,44 y 0,7 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹).

2.7.1 Pulpa de café con alto contenido de humedad

La pulpa de café presenta una relación C/N (25,1:1) adecuada para el proceso de compostaje, por lo tanto se puede utilizar sin necesidad de adicionar otra materia orgánica para regular la relación. Por esta razón muchas veces se realiza el proceso de compostaje utilizando solamente la pulpa de café.

Para observar el comportamiento de la broza en el reactor se llenan tres recipientes con 17 kg de broza, cada uno, a un contenido de humedad promedio de 86,6 %. Una vez analizada la materia orgánica, se procede a calcular la velocidad de entrada del aire para satisfacer la tasa de aireación propuesta utilizando las ecuaciones 14 y 15, con un diámetro de tubería de 20,61 mm medido con un Vernier digital. Para este caso se analizaron tres

tasas de aireación (0,18, 0,44 y 0,7 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹). Los cálculos de velocidad se muestran en el cuadro 2.2; una vez obtenido los datos teóricos se procede a medir la velocidad con el anemómetro digital y a medir la temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno en el reactor.

Cuadro 2.2. Velocidad del flujo para pulpa de café a tres tasas de aireación.

Componente	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Tasa de Aireación (l/min kg_{materia seca})	0,44	0,18	0,70
Materia seca (kg)	2,28	2,28	2,28
Flujo (l/min)	1,00	0,41	1,59
Flujo (m³/s)	1,70E-05	7,00E-06	2,70E-05
Área de tubería (m²)	3,30E-04	3,30E-04	3,30E-04
Velocidad (m/s)	0,05	0,02	0,08

Las mediciones se realizaron por un periodo de 5 días para observar el comportamiento de los factores previamente mencionados.

2.7.2 Pulpa de café a un contenido de humedad del 50 %

La siguiente prueba que se plantea es llevar el contenido de humedad de la broza al 50 %, ya que la teoría recomienda un contenido de humedad entre 40 y 60 % en base húmeda. Para esto se procedió a secar el café al sol por un lapso de tres días obteniendo los valores tabulados en el cuadro 2.3. El secado se realizó extendiendo la pulpa de café sobre un plástico negro. Al utilizar un sistema de secado al sol no se tiene un control adecuado sobre el contenido de humedad de la materia, por lo que cuando se realiza la medición se

obtiene un valor promedio menor al 50 % esperado, por lo tanto se procede a agregar agua a la materia para llevarla al 50 % especificado. Para conocer la cantidad de agua a agregar a la mezcla, primeramente debemos calcular la masa de agua que contiene la materia orgánica con la que haremos la composta (cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Contenido de humedad de la pulpa luego de ser secada al sol.

Recipiente	Masa recipiente (g)	Masa total húmeda (g)	Masa húmeda (g)	Masa seca total (g)	Masa de agua (g)	Masa seca (g)	H _{bh} (%)	H _{bs} (%)
B1	37,84	52,94	15,10	47,35	5,59	9,51	37,02	58,78
B2	37,67	56,27	18,60	49,47	6,80	11,80	36,56	57,63
B3	38,11	54,68	16,57	48,81	5,87	10,7	35,43	54,86
B4	37,54	56,09	18,55	49,98	6,11	12,44	32,94	49,12
Promedio							35,49	55,10

Despejando la ecuación 9 obtenemos:

$$H_{bh} = \frac{m_{agua}}{m_{total}}$$

$$m_{agua} = m_{total} * H_{bh}$$

Calculamos la masa seca con la ecuación 8:

$$m_{seca} = m_{total} - m_{agua}$$

Para obtener un contenido de humedad del 50% se debe cumplir la siguiente relación:

$$m_{agua} + m_{agregar} = m_{seca} \quad (17)$$

Cuadro 2.4. Masa de agua a agregar a la materia orgánica para un contenido de humedad del 50 %.

Masa Total (kg)	7,50
Hbh (%)	35,49
Masa de agua (kg)	2,66
Masa seca (kg)	4,84
Masa de agua a agregar (kg)	2,18

Una vez caracterizada la materia orgánica a la que se le realizará el proceso de compostaje, se procede a calcular la velocidad del aire para una tasa de aireación de 0,18, 0,44 y 0,70 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹ (cuadro 2.5). Para este experimento se llena cada recipiente con 7,50 kg de pulpa de café a un contenido de humedad del 50 %. Se monitorea la concentración de oxígeno y temperatura de la materia en tres puntos.

Cuadro 2.5. Velocidad del flujo para pulpa al 50%.

Componente	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Tasa de Aireación (l/min kg_{materia seca})	0,18	0,70	0,44
Materia seca (kg)	4,84	4,84	4,84
Flujo (l/min)	0,87	3,39	2,13
Flujo (m³/s)	1,45E-05	5,65E-05	3,55E-05
Área de tubería (m²)	3,30E-04	3,30E-04	3,30E-04
Velocidad (m/s)	0,04	0,17	0,11

2.7.3 Mezcla de pulpa de café y borucha de madera

Continuando con los métodos propuestos por Haug (1980) se procede a agregar borucha de madera como enmienda para la humedad y la relación C/N de la pulpa de café, así como agente volumétrico para evitar la compactación de la materia orgánica. Una vez adquirida la borucha de madera se procede a secarla al sol por 3 días y luego medir su contenido de humedad. Cabe destacar que luego del secado la borucha se almacena en sacos y se da un tiempo de 2 días antes de la medición para que su contenido de humedad llegue a un equilibrio. Luego de obtener las muestras se procede a continuar con la metodología propuesta para el cálculo del contenido de humedad de la materia orgánica utilizada (ecuación 9 y 10) (cuadro 2.6).

Cuadro 2.6. Contenido de humedad de la borucha y la pulpa de café para prueba a 0,18, 0,44 y 0,70 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹.

Recipiente	Masa total húmedo (g)	Masa total seco (g)	Masa agua (g)	Masa seca (g)	CH _{bh} (%)	CH _{bs} (%)
BO1	48,31	46,04	2,27	7,87	22,39	28,84
BO2	48,22	45,4	2,82	7,85	26,43	35,92
B1	84,61	46,03	38,58	8,13	82,59	474,54
B2	77,31	44,24	33,07	6,57	83,43	503,35
B3	79,81	45,3	34,51	7,17	82,80	481,31

Donde: BO: Muestra de borucha de madera. B: Muestra de pulpa de café. CH_{bh}: Contenido de humedad en base húmeda (%). CH_{bs}: Contenido de humedad en base seca (%).

Como se puede observar el contenido de humedad de la pulpa disminuyó con respecto al primer lote utilizado, sin embargo sigue estando en niveles superiores al recomendado. En el caso de la borucha se tiene un contenido de humedad relativamente bajo que permitirá regular la mezcla. Para obtener las porciones de cada materia orgánica para una mezcla con las características recomendadas, se procede a iterar variando las

masas de cada material hasta obtener una relación C/N de 30:1 en la mezcla utilizando la ecuación 12.

Las cantidades obtenidas se resumen en el cuadro 2.7.

Cuadro 2.7. Relación C/N de la mezcla para tres tasas de aireación.

M_A (kg)	18,00
M_B (kg)	0,85
C/N_A	25,10
C/N_B	137,80
C/N_m	30,09

Las nuevas porciones de materia orgánica afectarán el contenido de humedad de la mezcla, por ende se debe recalcular utilizando la ecuación 13 (cuadro 2.8).

Cuadro 2.8. Contenido de humedad de la mezcla de pulpa de café y borucha para tres tasas de aireación.

Materia Orgánica	Contenido de humedad en base húmeda promedio (%)	Masa total (kg)	Contenido de humedad de la mezcla (%)
Borucha	24,41	0,85	80,30
Broza	82,94	18,00	

Una vez obtenido el contenido de humedad de la mezcla y su relación C/N, se procede a calcular la velocidad de flujo para satisfacer una tasa de aireación de 0,18, 0,44 y 0,7 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹ utilizando la ecuación 14 y 15. Los datos se resumen en el cuadro 2.9.

Cuadro 2.9. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a tasas de aireación de 0,18, 0,44 y 0,71 $\text{l min}^{-1}\text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Componente	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Tasa de Aireación (l/min kg materia seca)	0,70	0,44	0,18
Materia seca (kg)	3,71	3,71	3,71
Flujo (l/min)	2,60	1,63	0,67
Flujo (m^3/s)	4,33E-05	2,72E-05	1,11E-05
Área de tubería (m^2)	3,30E-04	3,30E-04	3,30E-04
Velocidad (m/s)	0,13	0,08	0,03

Para efectos de esta prueba se monitorea la temperatura del aire a la salida del reactor y de la materia orgánica, temperatura ambiente y la concentración de oxígeno por diez días. Respecto a la temperatura del aire a la salida del reactor y la temperatura ambiente, se realiza una medición puntual diaria, la cual solamente nos permite conocer la ganancia de temperatura en el momento específico de realizar la toma de datos.

2.7.4 Mezcla de borucha de madera y pulpa de café a una tasa de aireación de 2,5 y 2,2 $\text{l min}^{-1}\text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$

Se procede a realizar una última prueba preliminar utilizando una mezcla de borucha y broza de café con una tasa de aireación de 2,5 $\text{l min}^{-1}\text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ en un reactor y otro a 2,2 $\text{l min}^{-1}\text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$. Se procede con la metodología propuesta para el cálculo del contenido de humedad para la broza fresca y la borucha; los datos se tabulan en el cuadro 2.10. Cabe destacar que la borucha utilizada es del mismo lote de la procesada anteriormente.

Cuadro 2.10. Contenido de humedad de la borucha y la pulpa de café para prueba a 2,2 y 2,5 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹.

Recipiente	Masa total húmeda (g)	Masa total seca (g)	Masa agua (g)	Masa seca (g)	CH _{bh} (%)	CH _{bs} (%)
B01	49,67	46,66	3,01	8,49	26,17	35,45
B02	49,13	46,35	2,78	8,80	24,01	31,59
B1	82,39	46,39	36,00	8,49	80,92	424,03
B2	83,18	46,66	36,52	8,99	80,25	406,23
B3	74,30	45,29	29,01	7,16	80,20	405,17

Para efectos del experimento se utiliza la misma relación de masas de la prueba anterior, con 18 kg de broza fresca y 0,85 kg de borucha, para una relación C/N cercana a 30,01. El resumen de datos para el cálculo de velocidad se muestra en el cuadro 2.11.

Cuadro 2.11. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a tasa de aireación de 2,5 y 2,2 l min⁻¹kg_{materia seca}⁻¹.

Componente	Reactor 1	Reactor 2
Tasa de Aireación (l/min kg _{materia seca})	2,50	2,20
Materia seca (kg)	4,15	4,15
Flujo (l/min)	10,39	9,14
Flujo (m ³ /s)	1,73E-04	1,52E-04
Área de tubería (m ²)	3,30E-04	3,30E-04
Velocidad (m/s)	0,52	0,46

Se monitorea la temperatura de la mezcla en tres puntos y la concentración de oxígeno durante 8 días.

2.8 Prueba 1, pulpa de café y borucha de madera a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$

Una vez finalizadas las pruebas preliminares, se procede a determinar la transferencia de calor del sistema a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$. Por lo tanto, primeramente se procede a calcular el contenido de humedad de cada materia orgánica a utilizar, obteniendo en promedio 83,29 % para la broza y 24,73 % para la borucha (cuadro 2.12).

Cuadro 2.12. Contenido de humedad para la broza y la borucha de madera a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

Recipiente	Masa recipiente (g)	Masa total húmeda (g)	Masa seca total (g)	Masa agua (g)	Masa seca (g)	CH _{bh} (%)	CH _{bs} (%)
BO1	37,67	47,46	45,10	2,36	7,43	24,11	31,76
BO2	38,13	47,87	45,40	2,47	7,27	25,36	33,98
B1	38,17	73,89	44,2	29,69	6,03	83,12	492,37
B2	37,55	73,31	44,38	28,93	6,83	80,90	423,57
B3	37,90	69,96	42,44	27,52	4,54	85,84	606,17

En este punto del experimento el beneficio comunica que están recibiendo café de otra región del país y es del llamado “café veranero”, el cual presenta la característica de ser una mezcla entre café maduro (rojo) y otros granos menos maduros (amarillo y verde). Esto provoca un cambio importante en la relación carbono nitrógeno, por lo que se realizan las pruebas de laboratorio correspondientes etiquetándola como “pulpa Santa Ana 1”, resultando una relación de 21,8.

Al existir un cambio importante en la relación C/N de una de las materias orgánicas, se debe recalcular la relación para la mezcla a utilizar si mantenemos las cantidades propuestas en las pruebas preliminares de 18 kg de pulpa y 0,85 kg de borucha de madera. Utilizando las ecuaciones 12 y 13 obtenemos la relación C/N y el contenido de humedad de la mezcla (cuadros 2.13 y 2.14).

Cuadro 2.13. Relación C/N de la mezcla para prueba 1 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Ma (kg)	18,00
Mb (kg)	0,85
C/NA	21,80
C/NB	137,80
C/Nm	27,03

Cuadro 2.14. Contenido de humedad de la mezcla para prueba 1 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Materia Orgánica	Contenido de humedad en base húmeda promedio (%)	Masa total (kg)	Contenido de humedad de la mezcla (%)
Borucha	24,73	0,85	80,65
Broza	83,29	18,00	

Seguidamente se calcula la velocidad del flujo de aire que se debe mantener en cada recipiente para satisfacer la tasa de aireación estipulada.

Cuadro 2.15. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

Componente	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Tasa de Aireación (l/min kg materia seca)	2,20	2,20	2,20
Materia seca (kg)	3,65	3,65	3,65
Flujo (l/min)	8,03	8,03	8,03
Flujo (m³/s)	1,34E-04	1,34E-04	1,34E-04
Área de tubería (m²)	3,30E-04	3,30E-04	3,30E-04
Velocidad (m/s)	0,41	0,41	0,41

2.9 Prueba 2, pulpa de café y borucha de madera a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$

Para la realización de esta prueba se procede una vez más a calcular el contenido de humedad de cada materia orgánica a utilizar (cuadro 2.16).

Cuadro 2.16. Contenido de humedad para la broza y la borucha a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.

Contenido de Humedad Inicial							
Recipiente	Masa Recipiente (g)	Masa total húmeda (g)	Masa seca total (g)	Masa agua (g)	Masa seca (g)	CH _{bh} (%)	CH _{bs} (%)
BO1	38,13	44,23	42,71	1,52	4,58	24,92	33,19
B1	38,17	73,27	43,19	30,08	5,02	85,70	599,20
B2	37,62	67,13	41,78	25,35	4,16	85,90	609,37
B3	37,90	79,81	43,52	36,29	5,62	86,59	645,73

Debido a que el beneficio de café informó sobre la utilización de una materia prima distinta, se procede a realizar una prueba en el laboratorio para obtener la relación C/N. La muestra se etiquetó como “pulpa Santa Ana 2” y se obtiene una relación de 21,4. Se procede a recalcularse el contenido de humedad y la relación C/N de la mezcla (cuadro 2.17 y 2.18).

Cuadro 2.17. Relación C/N de la mezcla para prueba 2 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Ma (kg)	18,00
Mb (kg)	0,85
C/N A	21,40
C/N B	137,8
C/N m	26,65

Cuadro 2.18. Contenido de humedad de la mezcla para prueba 2 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Materia orgánica	Contenido de humedad en base húmeda promedio (%)	Masa total (kg)	Contenido de humedad de la mezcla (%)
Borucha	24,92	0,85	83,31
Broza	86,06	18,00	

Seguidamente se procede a calcular la velocidad del flujo de aire que se debe mantener en cada recipiente para satisfacer la tasa de aireación estipulada.

Cuadro 2.19. Velocidad del flujo para mezcla de pulpa y borucha a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.

Componente	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3
Tasa de Aireación (l/min kg materia seca)	2,20	2,20	2,20
Materia seca (kg)	3,15	3,15	3,15
Flujo (l/min)	6,92	6,92	6,92
Flujo (m³/s)	1,15E-04	1,15E-04	1,15E-04
Área de tubería (m²)	3,30E-04	3,30E-04	3,30E-04
Velocidad (m/s)	0,35	0,35	0,35

2.10 Análisis estadístico

Se realiza un análisis de varianza con el fin de conocer si existen diferencias significativas entre las variables analizadas en cada prueba y entre ellas. Los tratamientos evaluados para cada prueba fueron la temperatura de la materia orgánica en los tres puntos de medición, la temperatura en cada recipiente y la concentración de oxígeno en cada

recipiente. Asimismo se analizó la temperatura promedio y la concentración de oxígeno entre las pruebas 1 y 2. Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar con unidades experimentales uniformes.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Caracterización de la materia orgánica

Las características que presenta la materia prima nos indica cómo debemos controlar el proceso de compostaje, por lo tanto es primordial conocer su relación C/N y contenido de humedad inicial. En el cuadro 3.1 se muestra el contenido de humedad de la broza y borucha utilizada; y en el cuadro 3.2 la relación C/N para la borucha de madera y los tres lotes de pulpa de café empleados.

Cuadro 3.1. Contenido de humedad inicial de la broza de café y borucha de madera.

Muestra	Contenido de Humedad (%)
Broza	
1	82,59
2	83,43
3	83,80
4	87,03
5	86,22
6	86,65
7	86,00
Promedio	85,10
Borucha	
1	22,39
2	26,43
3	25,67
Promedio	24,83

Como se aprecia en el cuadro 3.1 el contenido de humedad de la broza es alto y se sale de los rangos recomendados por diferentes autores. Cabe destacar que este es el contenido de humedad de la broza justamente al salir del proceso de beneficiado y es así como los distintos beneficios la utilizan para producir abono orgánico. En el caso de la borucha, esta se logró llevar a este contenido de humedad después de dos días de secado al sol y las mediciones se realizaron después de tres días de almacenamiento con el fin de que

la borucha llegará a un equilibrio. La borucha además de ser un agente de volumen, permite reducir el contenido de humedad a la hora de realizar la mezcla.

Cuadro 3.2. Análisis químico de abonos orgánicos.

Abono	%		Relación
	N	C	C/N
Pulpa Santo Domingo	1,81	45,40	25,1
Pulpa Santa Ana 1	1,76	38,37	21,8
Pulpa Santa Ana 2	1,88	40,20	21,4
Borucha	0,34	46,85	137,8

Respecto a la relación carbono/nitrógeno, los análisis realizados por el Laboratorio de Suelos y Foliar de la Universidad de Costa Rica arrojaron los datos que se muestran en el cuadro 3.2. La borucha de café presenta una alta relación de C/N debido a su alto contenido de carbono y bajo contenido de nitrógeno, lo que permite aumentar la relación de la mezcla y así aportar mayor cantidad de materia orgánica. Respecto a la broza se analizaron tres lotes ya que el beneficio de Coopelibertad procesa café de diferentes zonas del Valle Central. Como era de esperar la pulpa del lote de Santa Ana presentó una relación C/N menor a la de Santo Domingo, que se debe al momento de cosecha de los lotes. El lote de Santa Ana se procesó finalizando la temporada de cosecha, por lo tanto es una práctica muy común que los cafetaleros recolecten granos verdes y rojos con el fin de cosechar todo el café y preparar las plantas para la próxima temporada. Por esta razón la cantidad de carbono presente en el material tiende a disminuir.

3.2 Pruebas preliminares

3.2.1 Pulpa de café a tres tasas de aireación

Los resultados obtenidos para la medición de la temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno se muestran en los cuadros 3.3, 3.4 y 3.5. Para una tasa de aireación de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ la temperatura de la materia orgánica se mantuvo en un promedio de $25,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y los valores más altos se encontraron en el punto de medición 2, esto nos infiere que el oxígeno en la masa es pobre (menores al 10 %) y se refleja en la temperatura. Los valores de temperatura más altos en los tres puntos de medición se consiguieron en el día 1 y se debe a que fue el momento donde las bacterias mesófilas contaban con mayor oxígeno para su consumo.

Cuadro 3.3. Temperatura de la materia orgánica y % de oxígeno a una tasa de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, recipiente 2.

Día	Temp 1 ($^{\circ}\text{C}$)	Temp 2 ($^{\circ}\text{C}$)	Temp 3 ($^{\circ}\text{C}$)	T prom ($^{\circ}\text{C}$)	Oxígeno (%)
0	28,2	29,4	31,2	$29,6 \pm 1,5$	20,5
1	29,3	30,7	29,6	$29,9 \pm 0,7$	1,9
2	26,0	28,0	26,0	$26,7 \pm 1,2$	3,2
3	24,1	24,5	24,1	$24,2 \pm 0,2$	1,3
4	23,6	23,7	23,0	$23,4 \pm 0,4$	1,6
5	23,7	24,4	23,3	$23,8 \pm 0,6$	1,6

Para el recipiente 1 a una tasa de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ (cuadro 3.4) la temperatura de la materia tuvo un ligero incremento en el punto de medición 3 ya que es el primer contacto del aire que ingresa con la materia orgánica, lo que permite una mayor oxigenación que en el resto del material. Asimismo se observa que la concentración de oxígeno en un principio se encontraba saturada, sin embargo a partir del primer día de medición esta disminuye a valores menores al 10 % recomendado.

Cuadro 3.4. Temperatura de la materia orgánica y % de oxígeno a una tasa de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, recipiente 1.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	29,7	29,3	30,9	$30,0 \pm 0,83$	20,4
1	30,6	31,7	33,6	$32,0 \pm 1,52$	1,3
2	27,7	30,6	35,4	$31,2 \pm 3,89$	8,0
3	24,0	29,0	36,6	$29,9 \pm 6,34$	12,5
4	24,9	30,5	37,0	$30,8 \pm 6,06$	2,9
5	24,8	28,0	30,0	$27,6 \pm 2,62$	0,9

A una tasa de $0,7 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ se observó una tendencia similar a los casos anteriores, donde la concentración de oxígeno cae drásticamente a partir del primer día de medición (cuadro 3.5). Esto se debe a que las bacterias mesófilas empiezan a consumir el oxígeno para poder respirar; el proceso de respiración libera calor y calienta la materia orgánica. A partir del segundo día de medición la tasa de oxigenación no supe de manera adecuada las bacterias por lo que la respiración disminuye, reduciendo así la temperatura en la materia. En la figura 3.1 se muestran los valores promedio de temperatura de la materia orgánica evaluada; se denota que al aumentar la tasa de aireación, incrementa la temperatura de la masa a un pico de $41,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A pesar de que existió un aumento de temperatura, la concentración de oxígeno se mantuvo menor a 10 % en todos los casos, provocando una rápida caída en la temperatura debido a que las bacterias no contaban con el oxígeno necesario para realizar el proceso de respiración.

Cuadro 3.5. Temperatura de la materia orgánica y el porcentaje de oxígeno a una tasa de $0,7 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, recipiente 3.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	27,4	26,1	29,6	$27,7 \pm 1,8$	20,7
1	29,3	31,7	21,0	$27,3 \pm 5,6$	1,3
2	30,9	44,3	48,5	$41,2 \pm 9,2$	1,1
3	28,0	37,0	45,0	$36,7 \pm 8,5$	0,3
4	24,3	29,1	36,4	$29,9 \pm 6,1$	0,6
5	25,5	28,0	30,9	$28,1 \pm 2,7$	0,9

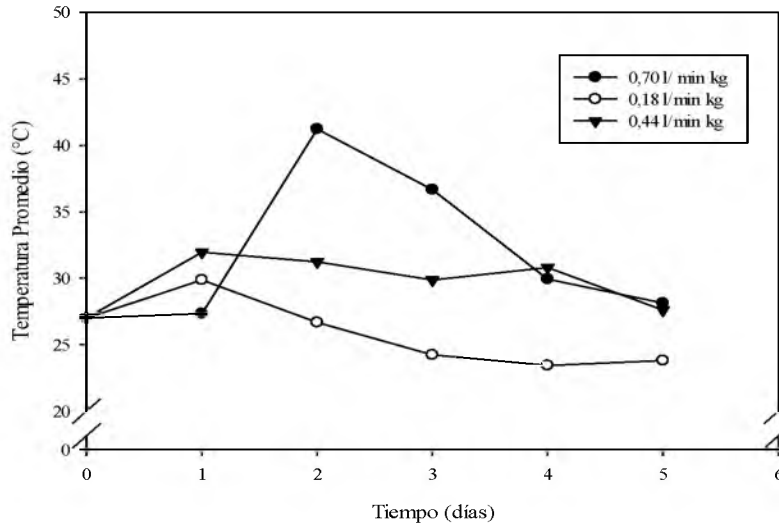


Figura 3.1. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo.

Cabe destacar en esta prueba que la temperatura de la materia orgánica aumenta conforme se incrementa la tasa de aireación. El mayor aumento en la temperatura se presentó para la tasa de aireación de $0,7 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ y la menor para la tasa de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$; para la de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ se observó una tendencia más constante, donde para el día 4 hubo un ligero aumento de la temperatura mientras que en los otros dos casos la tendencia era hacia la reducción.

Otro factor en la prueba fue la compactación de la materia orgánica al cabo de 5 días de medición se encontró una reducción del 59 %, 53,6 % y 55,2 % para las tasas de 0,18, 0,44 y $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ respectivamente. Esto afecta directamente la porosidad reduciendo así la capacidad de oxigenar la materia.

Los resultado observados nos permiten concluir que para las condiciones descritas de alta humedad y baja porosidad, las tasas de aireación propuestas por la teoría de 0,18, 0,44 y $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ no satisfacen las necesidades de oxigenación para un proceso de compostaje eficiente de la pulpa de café, por lo tanto se deben buscar y probar otros valores y materiales para mejorar el proceso.

3.2.2 Pulpa de café a un contenido de humedad del 50 %

Los datos obtenidos para los recipientes 1, 2 y 3 se muestran en los cuadros 3.6, 3.7 y 3.8. Se observa que para los reactores, la materia orgánica no aumenta su temperatura considerablemente, obteniendo datos mucho menores a las pruebas realizadas bajo la mismas tasas de aireación a un contenido de humedad mucho mayor.

Cuadro 3.6. Temperatura de la materia orgánica a un contenido de humedad del 50 % y % de oxígeno del recipiente 1 a una tasa de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{ l kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	Temp prom (°C)	Oxígeno (%)	T ambiente (°C)
0	23,6	23,4	24,1	$23,7 \pm 0,4$	20,4	20,3
1	22,3	24,3	24,3	$23,6 \pm 1,2$	15,8	18,7
2	23,2	23,6	25,4	$25,5 \pm 1,2$	1,2	22,8
3	28,2	28,6	30,1	$29,0 \pm 1,0$	1,3	23,8
4	26,8	28,2	27,9	$27,6 \pm 0,7$	1,2	22,4
5	24,7	26,1	27,2	$26,0 \pm 1,3$	1,2	22,9

Las bajas temperaturas se deben principalmente al efecto de la temperatura sobre las bacterias mesófilas en el secado solar. Durante el secado se obtienen temperaturas mayores a 70 °C en la superficie del plástico con una duración de más de 30 minutos, lo cual inhibe el crecimiento y desarrollo de las bacterias mesófilas.

Cuadro 3.7. Temperatura de la materia orgánica a un contenido de humedad del 50 % y % de oxígeno del recipiente 3 a una tasa de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)	T ambiente (°C)
0	24,5	23,7	24,3	$24,2 \pm 0,4$	20,4	20,3
1	22,7	25,7	26,0	$24,8 \pm 1,8$	1,5	18,7
2	26,0	26,2	26,4	$26,2 \pm 0,2$	1,6	22,8
3	28,5	27,4	25,5	$27,1 \pm 1,5$	1,6	23,8
4	29,6	33,1	33,7	$32,1 \pm 2,2$	1,5	22,4
5	26,7	28,3	27,9	$27,6 \pm 0,8$	1,2	22,9

Cuadro 3.8. Temperatura de la materia orgánica a un contenido de humedad del 50 % y % de oxígeno del recipiente 2 a una tasa de $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)	T ambiente (°C)
0	24,3	24,7	23,1	$24,0 \pm 0,8$	20,5	20,3
1	20,7	24,1	24,0	$22,9 \pm 1,9$	1,6	18,7
2	29,6	36,8	36,4	$34,3 \pm 4,0$	1,5	22,8
3	29,2	29,6	28,2	$29,0 \pm 0,7$	1,7	23,8
4	26,8	32,2	28,5	$29,2 \pm 2,8$	1,7	22,4
5	26,2	26,6	24,5	$25,8 \pm 1,1$	1,6	22,9

Respecto al porcentaje de oxígeno, podemos observar que la tasa de aireación propuesta no satisface el porcentaje del 10 % de oxígeno recomendado por la literatura. Sus valores se encontraron muy por debajo del porcentaje requerido, lo cual pudo afectar también la temperatura de la materia orgánica.

3.2.3 Mezcla de pulpa de café y borucha de madera a 0,18, 0,44 y $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$

Tras diez días de monitoreo se obtienen datos de temperatura de la materia orgánica en tres puntos: temperatura de salida del reactor y ambiente al momento de las mediciones, así como la concentración de oxígeno a $0,18$, $0,44$ y $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ (cuadros 3.9, 3.10 y 3.11). En el cuadro 3.9 se muestran los datos de temperatura de la materia orgánica, de salida del reactor, y la concentración de oxígeno para la mezcla de borucha y broza de café a una tasa de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$. Cabe destacar que para este caso las temperaturas más altas se encuentran en el punto 1 que está más alejado de la entrada de aire, contrario a los resultados observados anteriormente. Asimismo la temperatura promedio es mayor que las observadas en la prueba con broza a la misma tasa de aireación, esto indica que existe una mejor aireación de la masa, sin embargo sigue siendo insuficiente.

Cuadro 3.9. Temperatura de la materia orgánica y concentración de oxígeno para la mezcla de borucha y broza de café a una tasa de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	25,6	24,5	22,1	$27,0 \pm 1,8$	20,5
1	35,7	33,1	29,0	$32,6 \pm 3,4$	1,6
2	31,4	29,8	27,5	$29,6 \pm 2,0$	0,7
3	32,9	31,0	27,3	$30,4 \pm 2,8$	1,2
4	32,8	30,9	27,9	$30,5 \pm 2,5$	1,7
5	32,5	30,7	25,9	$29,7 \pm 3,4$	2,7
6	34,3	32,2	26,9	$31,1 \pm 3,8$	2,7
7	31,6	32,1	26,6	$30,1 \pm 3,0$	1,7
8	31,6	30,9	26,3	$29,6 \pm 2,9$	3,3
9	31,8	32,7	27,0	$30,5 \pm 3,1$	7,3
10	27,7	26,5	25,3	$26,5 \pm 1,2$	1,2

Cuadro 3.10. Temperatura de la materia orgánica y concentración de oxígeno para la mezcla de borucha y broza de café a una tasa de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	22,9	21,5	20,2	$21,5 \pm 1,4$	20,6
1	34,4	32,7	37,2	$34,8 \pm 2,3$	1,2
2	34,7	34,6	39,2	$36,2 \pm 2,6$	0,9
3	33,8	25,1	41,5	$33,5 \pm 8,2$	0,6
4	33,3	35,0	40,6	$36,3 \pm 3,8$	1,0
5	29,1	34,3	38,9	$34,1 \pm 4,9$	1,3
6	34,4	36,3	28,7	$33,1 \pm 4,0$	2,8
7	27,6	38,3	39,2	$35,0 \pm 6,5$	4,3
8	30,7	37,5	32,8	$33,7 \pm 3,5$	9,0
9	26,8	35,1	31,8	$31,2 \pm 4,2$	10,2
10	26,9	34,8	32,0	$31,2 \pm 4,0$	10,6

Para una tasa de aireación de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seco}}^{-1}$ se observan temperaturas aún mayores a las obtenidas a una tasa de aireación menor, lo cual nos indica de una mejoría en la oxigenación de la mezcla. Los valores más altos de temperatura se obtienen en el punto 3 que es el más cercano a la entrada de aire y por ende presenta mejor

oxigenación. Respecto a la concentración de oxígeno los valores más bajos se encuentran relacionados a las temperaturas más altas registradas durante el experimento, lo que infiere una alta utilización de oxígeno durante esta fase. A partir del día 4 se observa una disminución en la temperatura y un aumento en la concentración de oxígeno que ratifica la relación oxígeno-temperatura que se da producto de la respiración de los microorganismos. Para los días 9 y 10 el % de oxígeno sobrepasa el 10 % recomendado que se debe a una reducción en la respiración.

Los valores más altos de temperatura en esta prueba se alcanzan para la tasa de aireación de $0,71 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, llegando a una fase termófila con valores de $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en el día 3. Destaca el rápido aumento de la temperatura en todas las tasas de aireación hasta el día 3, donde inicia el descenso gradual de la temperatura en el sistema. Al igual que en los casos anteriores se observa una intensa utilización del oxígeno cuando se obtienen las temperaturas más altas, sin embargo luego de alcanzar el pico térmico, la temperatura decae y la concentración de oxígeno aumenta hasta que el día 7 sobrepasa el 10 %.

Cuadro 3.11. Temperatura la materia orgánica y concentración de oxígeno para la mezcla de borucha y broza de café a una tasa de $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	26,1	24,2	21,6	$21,5 \pm 2,3$	20,4
1	41,2	44,3	42,5	$42,7 \pm 1,6$	1,6
2	39,5	48,8	51,1	$46,5 \pm 6,1$	1,3
3	38,2	50,0	51,1	$46,4 \pm 7,2$	2,5
4	34,3	47,5	47,2	$43,0 \pm 7,5$	3,2
5	26,5	43,1	42,0	$37,2 \pm 9,3$	4,3
6	30,7	40,9	39,0	$36,9 \pm 5,4$	8,3
7	25,3	37,0	36,7	$33,0 \pm 6,7$	12,2
8	25,3	34,5	34,3	$31,4 \pm 5,3$	12,6
9	24,8	32,6	32,5	$30,0 \pm 4,5$	13,3
10	25,3	32,1	31,8	$29,7 \pm 3,8$	16,1

Comparando la temperatura promedio de la mezcla para las tres tasas de aireación evaluadas (figura 3.2), notamos que las temperaturas más altas en la mezcla se obtuvieron para la tasa de aireación de $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ manteniéndose por cuatro días a más de $40 \text{ }^\circ\text{C}$. La tasa de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ no alcanzó superar los $37 \text{ }^\circ\text{C}$ y su comportamiento fue oscilatorio en un rango entre $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y $36 \text{ }^\circ\text{C}$; este comportamiento se observa para la tasa de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ a una temperatura menor.

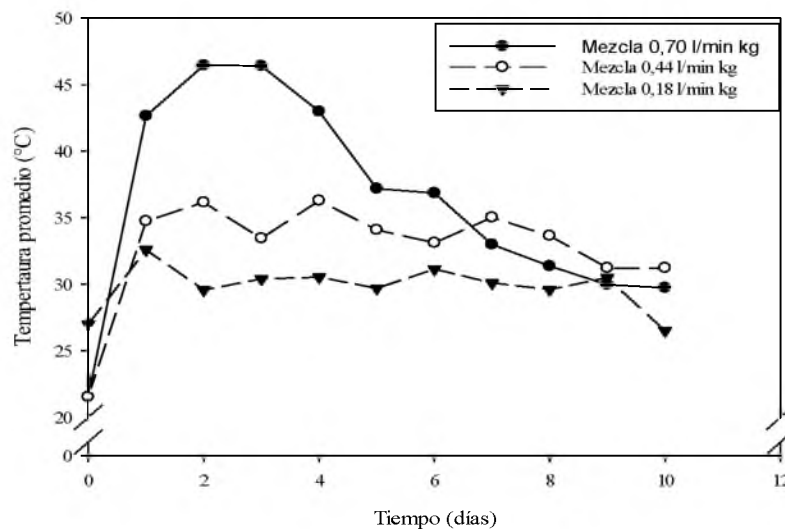


Figura 3.2. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo para una mezcla de borucha y pulpa de café.

La temperatura del aire a la salida del reactor nos permite conocer si existe un aumento en la temperatura de este al pasar por la materia orgánica durante el proceso de compostaje. En los cuadros 3.12, 3.13 y 3.14 se muestran los valores obtenidos en el momento específico de la toma de datos. Se aprecia que el diferencial de temperatura es mayor en los casos donde el flujo de aire es menor y no donde la masa alcanza valores más altos. Esto se debe principalmente a que a un flujo más bajo el aire puede estar en contacto por más tiempo con la materia caliente provocando una mayor eficiencia térmica que un

flujo de aire pasando por una masa caliente a mayor velocidad. Cabe destacar que los valores más altos para el diferencial de temperatura se encontraron cuando la temperatura de la masa alcanzó su punto máximo.

Cuadro 3.12. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $0,18 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	T ambiente (°C)	T promedio de materia orgánica (°C)	T salida (°C)	Δ T (°C)
0	20,1	27,0	24,7	4,6
1	22,6	32,6	26,7	4,1
2	24,4	29,6	28,6	4,2
3	22,5	30,4	26,3	3,8
4	23,4	30,5	27,8	4,4
5	20,7	29,7	24,7	4,0
6	24,2	31,1	26,9	2,7
7	20,9	30,1	23,3	2,4
8	19,6	29,6	23,5	3,9
9	22,7	30,5	25,0	2,3
10	22,8	26,5	23,8	1,0

Cuadro 3.13. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $0,44 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	T ambiente (°C)	T promedio de materia orgánica (°C)	T salida (°C)	Δ T (°C)
0	20,1	21,5	22,6	2,5
1	22,6	34,8	24,3	1,7
2	24,4	36,2	27,4	3,0
3	22,5	33,5	26,1	3,6
4	23,4	36,3	28,4	5,0
5	20,7	34,1	24,5	3,8
6	24,2	33,1	24,7	0,5
7	20,9	35,0	21,2	0,3
8	19,6	33,7	21,3	1,7
9	22,7	31,2	22,7	0,0
10	22,8	31,2	23,7	0,9

Cuadro 3.14. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	T ambiente (°C)	T promedio de materia orgánica (°C)	T salida (°C)	Δ T (°C)
0	20,1	21,5	25,0	4,9
1	22,6	42,7	25,2	2,6
2	24,4	46,5	25,0	0,6
3	22,5	46,4	25,1	2,6
4	23,4	43,0	24,4	1,0
5	20,7	37,2	21,6	0,9
6	24,2	36,9	25,1	0,9
7	20,9	33,0	21,6	0,7
8	19,6	31,4	21,8	2,2
9	22,7	30,0	24,0	1,3
10	22,8	29,7	23,7	0,9

3.2.4 Mezcla de borucha y pulpa de café a una tasa de aireación de 2,5 y 2,2 l min⁻¹ kg materia seca⁻¹

En los cuadros 3.15 y 3.16 se muestran los datos de temperatura y concentración de oxígeno tras evaluar una mezcla de borucha y pulpa de café fresca a 2,2 y 2,5 l min⁻¹ kg materia seca⁻¹. En cuadro 3.15 se observa que las temperaturas más altas en la mezcla se alcanzan al tercer día y en el punto de medición 3 se concentran las mayores temperaturas; el mismo comportamiento se observa para la tasa de 2,5 l min⁻¹ kg materia seca⁻¹ pero con una temperatura ligeramente menor. Con respecto a la concentración de oxígeno observamos que ambas tasas mantienen el porcentaje de oxígeno arriba del 10 %, con la salvedad del día 3 en el recipiente 1 donde se obtiene un porcentaje de 9,3 %. Como era de esperar la tasa de 2,5 l min⁻¹ kg materia seca⁻¹ presentó valores más altos teniendo su porcentaje más bajo al cuarto día, a diferencia del caso de 2,2 l min⁻¹ kg materia seca⁻¹ donde se obtuvo el valor más bajo en el pico de temperatura de la materia orgánica.

Cuadro 3.15. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de 2,2 l min⁻¹kg materia seca⁻¹, recipiente 1.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	26,4	27,9	28,3	27,5 ± 1,0	20,7
1	32,6	33,4	29,4	31,8 ± 2,1	19,7
2	35,5	33,3	29,9	32,9 ± 2,8	19,4
3	46,6	57,4	58,3	54,1 ± 6,5	9,3
4	33,6	46,0	48,3	42,6 ± 7,9	13,4
5	27,5	40,9	42,5	37,0 ± 8,2	13,1
6	25,6	32,9	39,8	32,8 ± 7,1	12,6
7	25,8	28,8	39,5	31,4 ± 7,2	11,3

Cuadro 3.16. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,5 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, recipiente 2.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	28,0	31,6	32,6	$30,7 \pm 2,4$	20,6
1	34,2	35,6	39,0	$36,3 \pm 2,5$	16,5
2	34,5	50,7	49,6	$44,9 \pm 9,1$	15,5
3	33,8	51,6	49,1	$44,8 \pm 9,6$	16,5
4	29,5	46,4	46,8	$40,9 \pm 9,9$	13,4
5	26,3	38,3	40,5	$35,0 \pm 7,6$	16,5
6	26,3	32,6	37,7	$32,2 \pm 5,7$	15,3
7	27,2	29,9	38,4	$31,8 \pm 5,8$	15,9

Las mediciones de temperatura ambiente y temperatura del aire en la salida del reactor se muestran en los cuadros 3.17 y 3.18. El valor más alto de diferencial de temperatura se obtuvo para la tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ con $12,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para la tasa de $2,5 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$ fue $11,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Cabe destacar que los valores máximos se obtuvieron el día 3, donde se tiene la temperatura más alta de la materia.

Cuadro 3.17. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	T ambiente (°C)	T promedio de materia orgánica (°C)	T salida (°C)	ΔT (°C)
0	20,3	27,5	21,0	0,7
1	19,3	31,8	22,7	3,4
2	21,8	32,9	29,6	7,8
3	20,5	54,1	32,8	12,3
4	20	42,6	28,8	8,8
5	20,1	37,0	27,8	7,7
6	19,7	32,8	24,9	5,2
7	20,7	31,4	25,8	5,1

Cuadro 3.18. Temperatura del aire a la salida del reactor y su diferencia respecto a la temperatura ambiente para una tasa de aireación de $2,5 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

Día	T ambiente (°C)	T promedio de materia orgánica (°C)	T salida (°C)	ΔT (°C)
0	20,3	30,7	21,4	1,1
1	19,3	36,3	21,5	2,2
2	21,8	44,9	33,3	11,5
3	20,5	44,8	32,2	11,7
4	20	40,9	26,3	6,3
5	20,1	35,0	26,0	5,9
6	19,7	32,2	22,2	2,5
7	20,7	31,8	23,5	2,8

3.3 Calibración de los equipos de registro de datos de temperatura y humedad relativa

Luego de realizar las curvas de ajuste entre cada medidor de temperatura y el equipo de referencia, se obtienen las ecuaciones de ajuste que se muestran en el cuadro 3.19. Como se puede observar la varianza entre los datos no es representativa, sin embargo en algunos casos se trabajará con diferencias de temperatura pequeñas que deben ser cuantificadas de la mejor manera.

Respecto a la humedad relativa, en el cuadro 3.18 se muestran las ecuaciones de ajuste para cada hobo. Se encontró una mayor varianza a la observada para la temperatura, especialmente a humedades relativas bajas. Conforme la humedad relativa aumenta, la varianza disminuye.

Cuadro 3.19. Ecuación de ajuste para cada medidor de temperatura utilizado.

Sensor de temperatura comparado	Función	Sensor de referencia	Ecuación de ajuste	R²
H18	Temperatura ambiente	U14	$y = 1,0367x - 1,243$	0,9992
H09	Temperatura del aire a la salida del reactor 2	U14	$y = 1,011x - 0,9289$	0,9997
H21	Temperatura del aire a la salida del reactor 3	U14	$y = 1,026x - 1,0908$	0,9993
H39	Temperatura del aire a la salida del reactor 1	U14	$y = 1,0334x - 0,8406$	0,9992

Cuadro 3.20. Ecuación de ajuste para humedad relativa.

Sensor de temperatura comparado	Función	Ecuación de ajuste	R²
H18	Ambiente	$y = 1,0184x - 1,7626$	0,9944
H09	Reactor 2	$y = 0,9027x + 10,713$	0,9998
H21	Reactor 3	$y = 0,8326x + 15,687$	0,9967
H39	Reactor 1	$y = 0,8676x + 6,6248$	0,9917

3.4 Mezcla de pulpa de café y borucha de madera a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1

3.4.1 Temperatura y % oxígeno en la mezcla

En los cuadros 3.21, 3.22 y 3.23 se muestran los datos diarios de temperatura de la materia orgánica en sus tres puntos de medición en el reactor y la concentración de oxígeno en el reactor durante los 14 días de medición de esta prueba. Se puede observar un comportamiento similar entre los reactores donde existe un aumento de temperatura en dos puntos específicos que son el día 1 y día 4, concordando con los días de máximo consumo de oxígeno. La temperatura más alta se registró para el recipiente 2 con $54,0 \text{ }^\circ\text{C}$ en promedio, seguido por el recipiente 1 con $49,2 \text{ }^\circ\text{C}$, ambos para el día 1, y por último el recipiente 3 con $49,0 \text{ }^\circ\text{C}$ para el día 4.

Cuadro 3.21. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1 recipiente 1.

Día	Temp 1 ($^\circ\text{C}$)	Temp 2 ($^\circ\text{C}$)	Temp 3 ($^\circ\text{C}$)	T prom ($^\circ\text{C}$)	Oxígeno (%)
0	32,7	33,1	34,2	$33,3 \pm 0,8$	20,4
1	51,8	52,3	43,4	$49,2 \pm 5,0$	17,0
2	44,7	45,6	37,0	$42,4 \pm 4,7$	18,4
3	42,3	45,1	36,9	$41,4 \pm 4,2$	18,8
4	41,8	48,5	43,9	$44,7 \pm 3,4$	18,3
5	35,5	46,1	40,5	$40,7 \pm 5,3$	19,0
6	32,9	40,1	37,4	$36,8 \pm 3,6$	19,6
7	25,7	35,8	34,1	$31,9 \pm 5,4$	19,8
8	25,0	33,0	32,1	$30,0 \pm 4,4$	19,9
9	24,2	30,7	30,3	$28,4 \pm 3,6$	20,1
10	23,1	30,6	31,8	$28,5 \pm 4,7$	20,0
11	24,4	31,8	32,0	$29,4 \pm 4,3$	19,8
12	25,9	32,9	32,8	$30,5 \pm 4,0$	19,8
13	24,6	30,2	34,0	$29,6 \pm 4,7$	19,6
14	25,0	28,2	33,7	$29,0 \pm 4,4$	18,5

Cuadro 3.22. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1 recipiente 2.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	33,1	32,8	32,9	$32,9 \pm 0,2$	20,3
1	54,7	56,2	51,2	$54,0 \pm 2,6$	14,7
2	45,9	46,8	41,3	$44,7 \pm 3,0$	16,7
3	42,1	45,6	40,7	$42,8 \pm 2,5$	16,7
4	45,5	48,8	46,2	$46,8 \pm 1,7$	15,7
5	41,2	47,0	43,6	$43,9 \pm 2,9$	16,9
6	34,4	43,1	39,6	$39,0 \pm 4,4$	18,2
7	30,5	37,5	35,2	$34,4 \pm 3,6$	19,0
8	28,0	34,9	32,7	$31,9 \pm 3,5$	19,3
9	25,9	32,5	30,7	$29,7 \pm 3,4$	19,6
10	24,1	32,9	32,6	$29,9 \pm 5,0$	19,6
11	24,8	33,8	32,3	$30,3 \pm 4,8$	19,2
12	26,7	34,0	33,2	$31,3 \pm 4,0$	19,2
13	25,3	33,3	34,3	$31,0 \pm 4,9$	19,2
14	25,8	30,2	31,8	$29,3 \pm 3,1$	19,1

Cuadro 3.23. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1 recipiente 3.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	33,5	33,4	33,0	$33,3 \pm 0,3$	20,4
1	43,1	43,1	42,8	$43,0 \pm 0,2$	16,6
2	43,7	43,0	40,7	$42,5 \pm 1,6$	16,2
3	44,5	45,6	43,3	$44,5 \pm 1,2$	16,5
4	49,9	49,6	47,6	$49,0 \pm 1,3$	16,0
5	45,5	46,9	45,6	$46,0 \pm 0,8$	16,6
6	36,0	40,6	39,4	$38,7 \pm 2,4$	18,4
7	31,9	35,9	35,5	$34,4 \pm 2,2$	18,9
8	30,5	35,1	33,9	$33,2 \pm 2,4$	18,9
9	27,1	37,3	35,9	$33,4 \pm 5,5$	18,5
10	24,0	30,7	32,0	$28,9 \pm 4,3$	18,6
11	26,2	35,7	28,2	$30,0 \pm 5,0$	18,6
12	27,0	32,3	37,1	$32,1 \pm 5,1$	18,9
13	26,0	25,5	37,0	$29,5 \pm 6,5$	19,2
14	26,1	25,8	35,4	$29,1 \pm 5,5$	19,5

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio de la materia orgánica durante el experimento a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$. Cabe destacar que la temperatura promedio en los reactores 1 y 2 presenta el mismo comportamiento a lo largo del experimento, resguardando un diferencial de temperatura que se reduce hacia la parte final del experimento. En el caso del recipiente 3 se denota que para el día 1 presentó el menor valor entre los reactores, sin embargo para el día 4 los supera. A partir del día 10 la diferencia de temperatura entre los reactores se reduce considerablemente. Asimismo se denota como la temperatura decae luego del día 4 hasta llegar a valores cercanos a los $30 \text{ }^\circ\text{C}$, a pesar de que existe una alta concentración de oxígeno en el reactor.

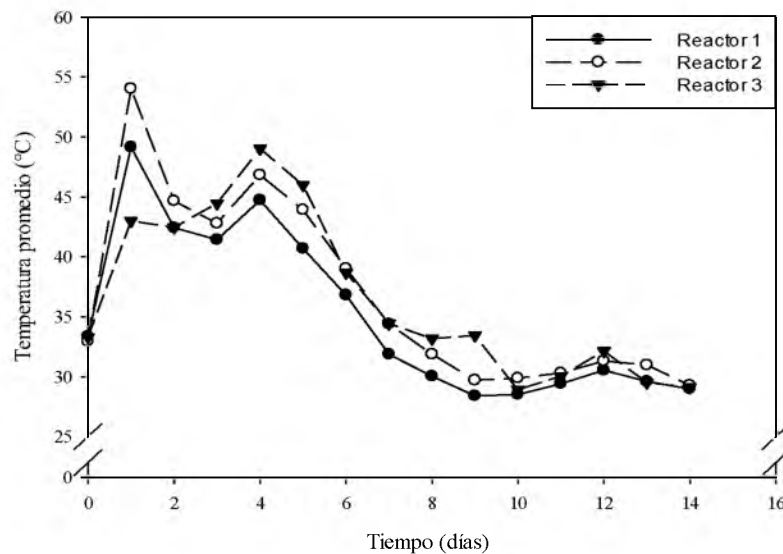


Figura 3.3. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo para la prueba 1 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$.

La concentración de oxígeno se mantuvo en valores superiores al 10 % para los tres reactores; lo que nos indica que existió una buena aireación del reactor durante toda la prueba. En los recipientes 1 y 2 se encontraron los menores valores de oxígeno en el día 1,

concordando con el cambio de temperatura más alto en la materia orgánica. A diferencia de estos reactores, el recipiente 3 obtuvo su porcentaje de oxígeno más bajo cuando alcanzó el valor máximo de temperatura en la materia orgánica (día 4); sin embargo al igual que el recipiente 1 y 2 se observa el mayor diferencial en la concentración de oxígeno e el día 1 al pasar de 20,4 % a 16,6 %.

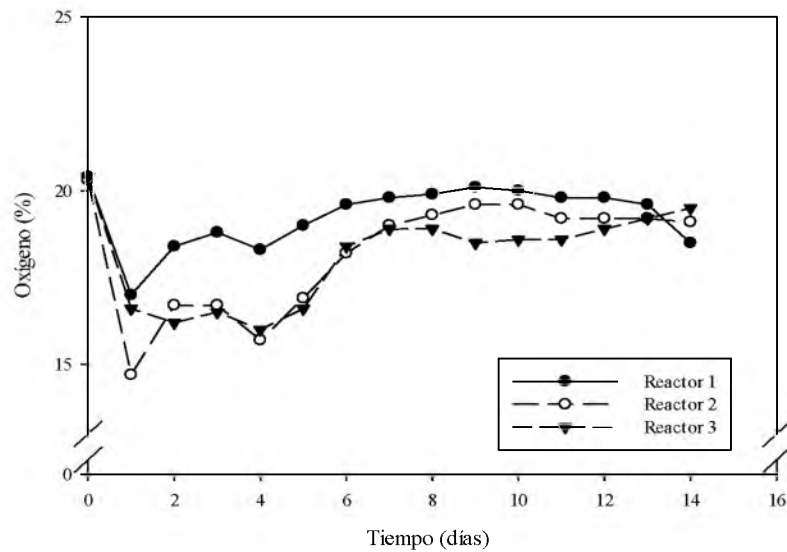


Figura 3.4. Oxígeno contra el tiempo para prueba 1 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

3.4.2 Diferencial de temperatura

En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestra la temperatura de salida del aire de cada reactor y la temperatura ambiente registrada por los medidores de temperatura instalados al inicio del experimento. En la figura 3.5 se observa un diferencial de temperatura más alto para los primeros días del proceso y este va disminuyendo conforme nos acercamos al final del experimento, esto se debe principalmente a las altas temperaturas imperantes durante la fase termófila que se da en los primeros días de toma de datos.

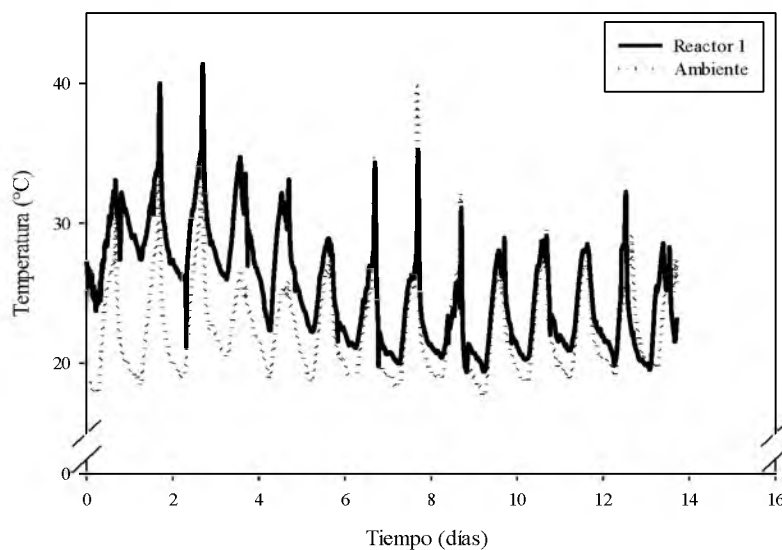


Figura 3.5. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

Para el reactor dos y tres se observa un comportamiento similar al del recipiente uno, donde el diferencial de temperatura es más alto para los primeros días del experimento. Sin embargo el diferencial para estos dos reactores es menor al encontrado para el recipiente 1 en los primeros cuatro días del experimento. Analizando las tres figuras, se revela como los diferenciales de temperatura más altos se obtienen cuando la temperatura del ambiente es menor, conforme avanza el día la temperatura de entrada al reactor tiende a igualar la temperatura de salida.

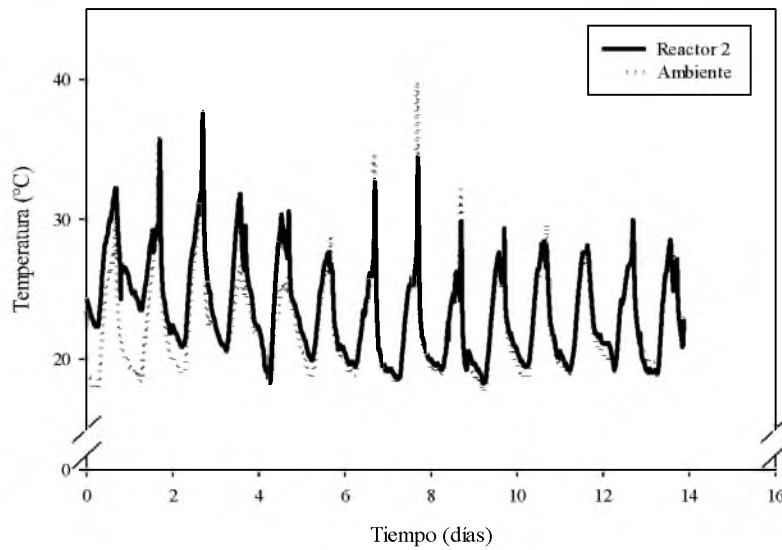


Figura 3.6. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 2 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

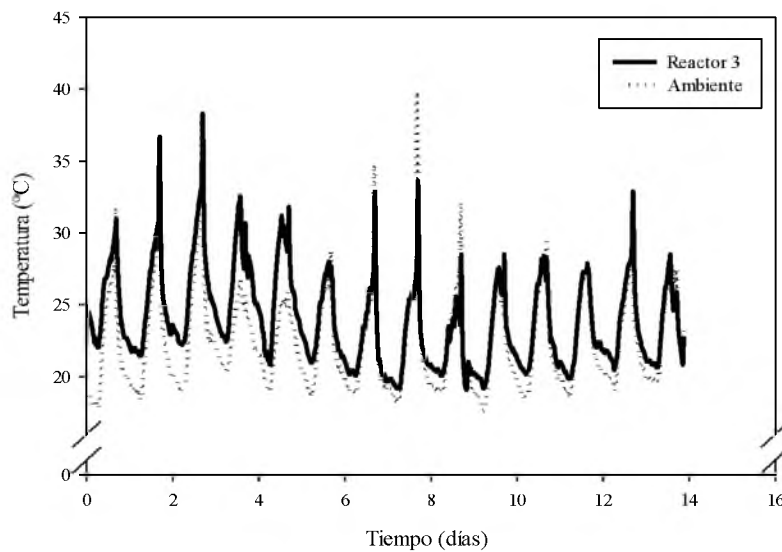


Figura 3.7. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

En el cuadro 3.24 se muestra el diferencial de temperatura promedio para los reactores analizados. El diferencial de temperatura más alto se obtuvo para el reactor 1 en el primer día de medición, seguido por el reactor 2 al inicio del experimento y por último el reactor tres al segundo día. Sin embargo analizando el promedio a lo largo de los 13 días de medición, el reactor 1 presenta el mayor diferencial de temperatura, seguido por el reactor 3 y por último el reactor dos. Cabe destacar que se obtuvieron datos negativos en el diferencial de temperatura en los tres reactores a lo largo del experimento, incrementándose a partir del día ocho. Esto se debe cuando existe un aumento en la temperatura del aire que ingresa al reactor, especialmente en las tardes donde el sol irradia directamente sobre los reactores. Además en los últimos días del experimento se observa como el aire se enfría al pasar por la materia orgánica debido a su alta humedad y baja temperatura.

Cuadro 3.24. Diferencial de temperatura promedio diario (°C) para los reactores 1, 2 y 3 a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

Día	Reactor 1 (°C)	Reactor 2 (°C)	Reactor 3 (°C)
0	6,6	4,7	3,2
1	7,2	2,8	2,2
2	6,1	1,7	3,4
3	4,6	1,7	3,3
4	2,6	0,8	1,5
5	1,6	0,3	0,6
6	1,1	0,0	0,4
7	0,5	0,0	0,2
8	1,6	0,8	1,2
9	1,5	0,7	1,1
10	1,6	0,6	0,9
11	0,1	0,3	1,4
12	1,0	-0,1	0,6

3.4.3 Razón de transferencia de calor

En las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se muestran las razones de transferencia de calor de la materia orgánica al aire cuando pasa a través del reactor. La tendencia estuvo regulada por la temperatura del aire en la entrada y salida del reactor al observar el mismo comportamiento de ondas a lo largo de la medición. Los valores obtenidos rondan entre 10 y 35 kJ/h. Entre los reactores se denota una mayor razón de transferencia de calor para el reactor 1 con valores máximos cercanos a los 50 kJ/h y mínimos de 15 kJ/h para los días 1, 2 y 3, y 10 kJ/h para los días 0 y 4. En los reactores 2 y 3 los valores máximos se mantienen cercanos a los 40 kJ/h y los mínimos se encuentran entre 10 kJ/h y 5 kJ/h. Cabe destacar que se observan picos en los tres reactores para los días 1 y 2 que responden a picos de temperatura obtenidos por la localización de los reactores cerca de las 15:00, cuando el sol incide con mayor intensidad sobre ellos; esto provoca mediciones máximas de 50,20 kJ/h para el reactor 1, 42,02 kJ/h para el reactor 2 y 41,36 para el 3.

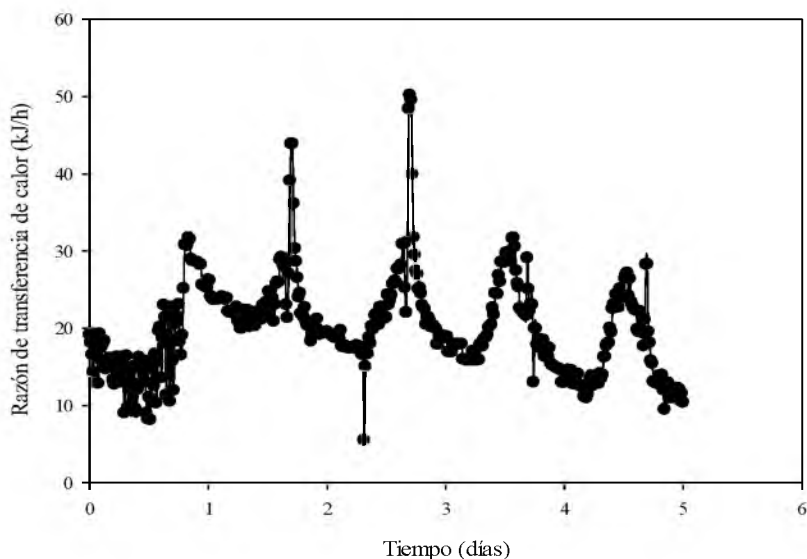


Figura 3.8. Razón de transferencia de calor al aire en el reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

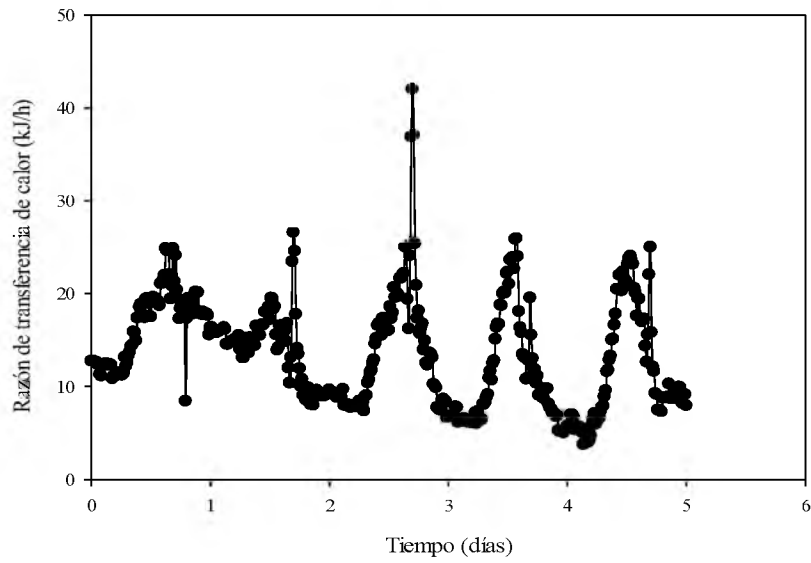


Figura 3.9. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 2 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

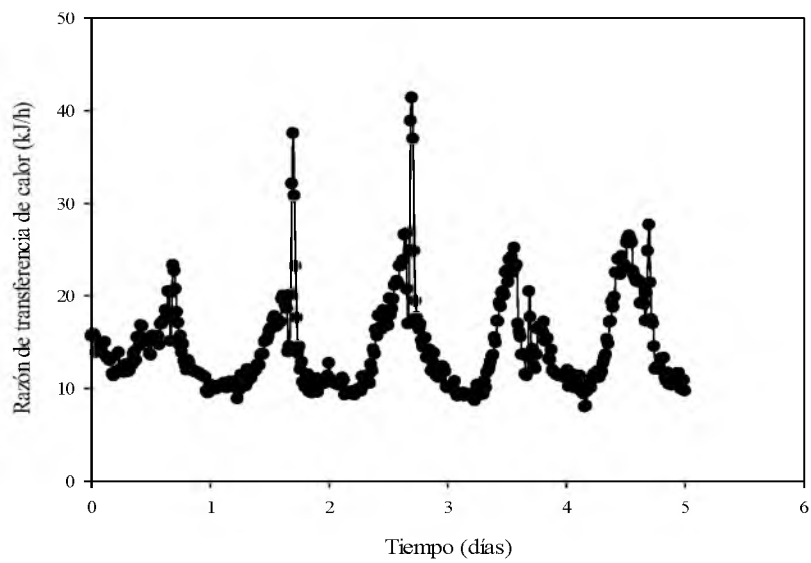


Figura 3.10. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 1.

3.5 Mezcla de pulpa de café y “borucha” de madera a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2

3.5.1 Temperatura y % oxígeno en la mezcla

En los cuadros 3.25, 3.26 y 3.27 se muestran las mediciones diarias de la temperatura de la materia orgánica en tres puntos del reactor, así como la concentración de oxígeno presente en el momento de la toma de datos de la temperatura. Las temperaturas más altas se registraron en el punto de medición 2 en los tres recipientes analizados con $46,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $46,6 \text{ }^\circ\text{C}$ para los reactores 1 2 y 3 respectivamente. En los puntos de medición 2 y 3 se obtuvieron las mayores temperaturas a lo largo del registro de datos, lo que nos indica la presencia del núcleo caliente en esta zona. La temperatura promedio más alta se obtuvo para el reactor 3 con un valor de $45,3 \text{ }^\circ\text{C}$ en el día 2, seguido por el reactor 1 con $43,9 \text{ }^\circ\text{C}$ y el recipiente 2 con $43,8 \text{ }^\circ\text{C}$ en el día 1 de medición. En la figura 3.11 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio de la materia orgánica a lo largo del experimento; se aprecia el aumento en la temperatura al primer y segundo día de medición. A partir de este incremento la temperatura en el reactor 1 inició su descenso, mientras que los reactores 2 y 3 tuvieron un ligero incremento hacia el día 2 donde inicia su disminución.

Cuadro 3.25. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2 recipiente 1.

Día	Temp 1 ($^\circ\text{C}$)	Temp 2 ($^\circ\text{C}$)	Temp 3 ($^\circ\text{C}$)	T prom ($^\circ\text{C}$)	Oxígeno (%)
0	31,5	29,9	21,7	$27,7 \pm 5,3$	20,5
1	42,2	46,2	43,3	$43,9 \pm 2,1$	17,9
2	36,9	45,6	41,7	$41,4 \pm 4,4$	18,5
3	31,3	43,1	39,1	$37,8 \pm 6,0$	18,9
4	27,4	38,8	36,2	$34,1 \pm 6,0$	19,5
5	24,3	35,8	34,3	$31,5 \pm 6,3$	19,6
6	25,1	33,9	33,2	$30,7 \pm 4,9$	19,8
7	26,9	33,7	33,0	$31,2 \pm 3,7$	19,7
8	24,3	31,1	31,4	$28,9 \pm 4,0$	20,0
9	25,5	30,9	31,0	$29,1 \pm 3,1$	19,9

Cuadro 3.26. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2 recipiente 2.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	26,6	21,8	18,8	$22,4 \pm 3,9$	20,6
1	42,9	45,4	41,5	$43,3 \pm 2,0$	15,3
2	41,2	47,5	42,6	$43,8 \pm 3,3$	15,9
3	35,7	45,8	42,8	$41,4 \pm 5,2$	16,5
4	32,2	41,0	38,1	$37,1 \pm 4,5$	17,8
5	26,9	35,7	33,5	$32,0 \pm 4,6$	18,8
6	27,1	33,7	32,7	$31,2 \pm 3,6$	19,0
7	28,2	33,5	32,9	$31,5 \pm 2,9$	19,0
8	25,7	31,5	31,3	$29,5 \pm 3,3$	19,4
9	26,7	31,4	31,3	$29,8 \pm 2,7$	19,4

Cuadro 3.27. Temperatura de la materia orgánica y la concentración de oxígeno para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2 recipiente 3.

Día	Temp 1 (°C)	Temp 2 (°C)	Temp 3 (°C)	T prom (°C)	Oxígeno (%)
0	31,0	29,5	22,6	$27,7 \pm 4,5$	20,6
1	44,6	45,8	43,8	$44,7 \pm 1,0$	15,4
2	44,7	46,6	44,5	$45,3 \pm 1,2$	16,1
3	40,3	44,2	42,3	$42,3 \pm 2,0$	16,5
4	35,2	39,7	38,4	$37,8 \pm 2,3$	17,9
5	30,9	35,4	35,0	$33,8 \pm 2,5$	18,7
6	28,9	33,4	33,5	$31,9 \pm 2,6$	19,1
7	30,7	33,1	33,0	$32,3 \pm 1,4$	19,0
8	25,5	30,2	31,1	$28,9 \pm 3,0$	19,5
9	26,1	30,5	31,0	$29,2 \pm 2,7$	19,5

En la figura 3.12 se observa como el porcentaje de oxígeno en los reactores presenta una disminución al inicio del experimento y a través de los días de medición este se incrementa de manera sostenida hasta niveles de 19 %. Esto nos muestra que una más vez se mantiene la mezcla sobre el nivel propuesto en la teoría. Cabe destacar que el reactor 1 mantuvo valores superiores a los encontrados en el reactor 2 y 3.

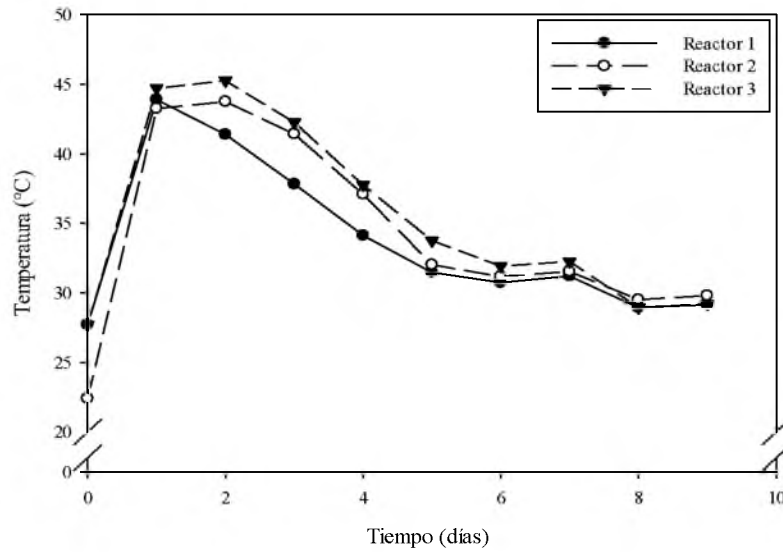


Figura 3.11. Temperatura promedio de la materia orgánica contra el tiempo para la prueba 2 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

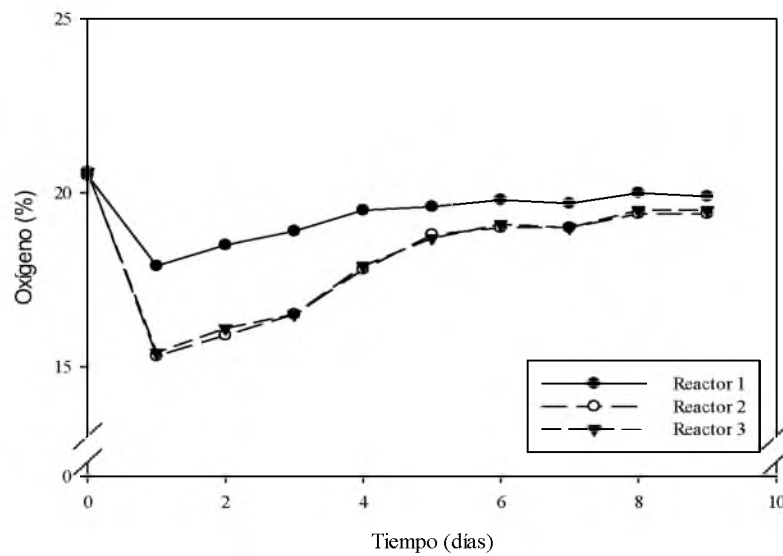


Figura 3.12. Oxígeno contra el tiempo para prueba 2 a $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$.

3.5.2 Diferencial de temperatura

En la figura 3.13 se muestra la temperatura del aire a la salida del reactor y la temperatura ambiente a lo largo de 14 días para el reactor 1. Se observa la misma tendencia de la prueba 1, donde la diferencia de temperatura es mayor en los primeros días del monitoreo y tiende a cero conforme avanza la medición. Asimismo la diferencia más grande se observa al finalizar el día cuando la temperatura ambiente es más baja y tiende a emparejarse cuando esta es mayor.

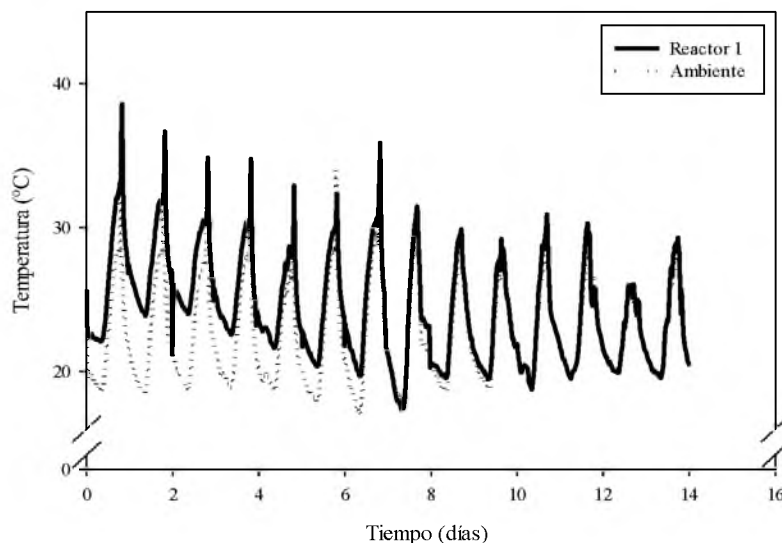


Figura 3.13. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.

El registro de la temperatura del aire en la salida del reactor 3 se cortó en el día 4 ya que el registrador de datos dejó de almacenar datos por problemas técnicos. En la figura 3.14 se muestran los valores obtenidos para 5 días de medición, donde se incluye el periodo de mayores temperaturas alcanzada por la materia orgánica. Al igual que el recipiente 1 se

observa la mayor diferencia entre las temperaturas cuando la temperatura del aire que ingresa al reactor es menor, además esta diferencia tiende a disminuir después del día 2. Respecto al recipiente 2, el registrador de datos falló a partir del día uno por lo que no se muestran sus datos.

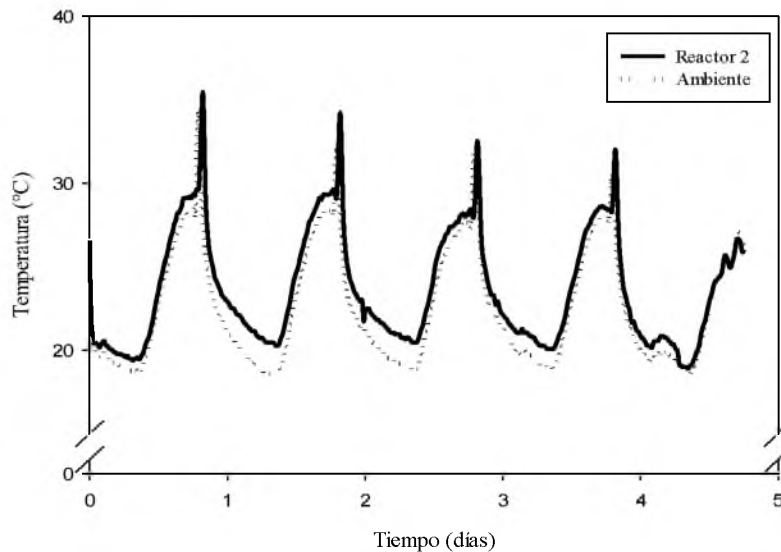


Figura 3.14. Temperatura del aire a la entrada y salida del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.

En el cuadro 3.28 se muestra el diferencial de temperatura promedio para los reactores analizados. Los diferenciales de temperatura más alto se obtuvieron al cumplir el primer día del experimento con valores de 10,6, 10,3 y 6,8 °C para los reactores 1, 2 y 3 respectivamente. Al analizar el promedio a lo largo de las 9 mediciones, el reactor 2 presenta el mayor diferencial de temperatura, seguido por el reactor 1 y por último el reactor tres. Cabe destacar que también se obtuvieron datos negativos en el diferencial de temperatura en los tres reactores a lo largo del experimento debido a un aumento en la

temperatura del aire que ingresa al reactor, especialmente en las tardes donde el sol irradia directamente sobre los reactores; esto se presentó con mayor regularidad hacia el final del experimento, cuando disminuye la temperatura de la materia orgánica.

Cuadro 3.28. Diferencial de temperatura promedio diario para los reactores 1, 2 y 3 a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$, prueba 2.

Día	Reactor 1 (°C)	Reactor 2 (°C)	Reactor 3 (°C)
0	5,9	5,0	5,7
1	10,6	10,3	6,8
2	5,7	9,0	6,1
3	5,3	9,0	4,8
4	7,1	8,0	5,1
5	4,4	4,6	3,2
6	3,5	4,8	3,1
7	4,2	5,0	2,9
8	2,7	2,6	1,5
9	4,5	4,1	2,3

3.5.3 Razón de transferencia de calor

En las figuras 3.15 y 3.16 se detalla la razón de transferencia de calor obtenida por el aire al pasar a través de la materia orgánica en los reactores 1 y 3 respectivamente. En el reactor 1 se presentaron valores máximos cercanos a 40 kJ/h, mientras que para el reactor 3 la razón de transferencia máxima fue cercana a los 30 kJ/h. Ambos reactores se ven fuertemente influenciados por la temperatura de entrada y salida del aire, al punto de que existen altos valores aislados que concuerdan con las temperaturas máximas que se obtienen cuando el sol incide directamente sobre los recipientes, cercano a las 15:00 horas y se repite a lo largo de los 5 días de evaluación. Este factor lleva a obtener un valor máximo de 41,80 kJ/h para el recipiente 1 y de 31,92 kJ/h para el recipiente 3.

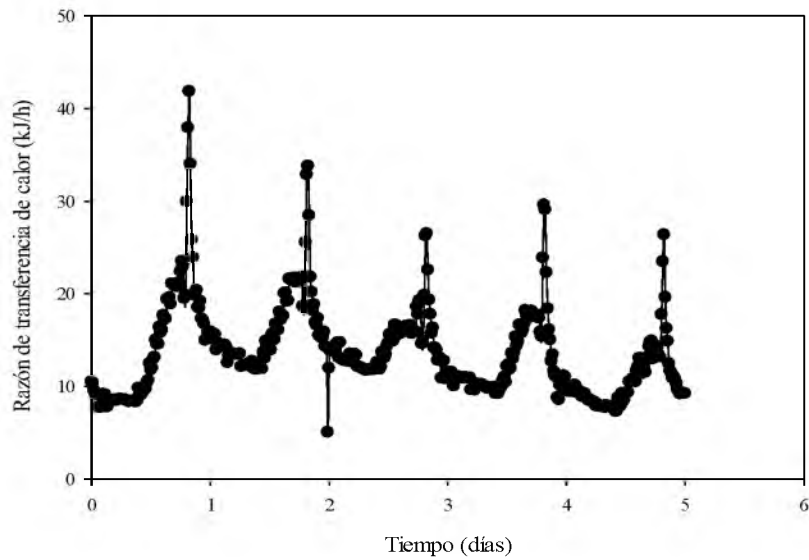


Figura 3.15. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 1 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.

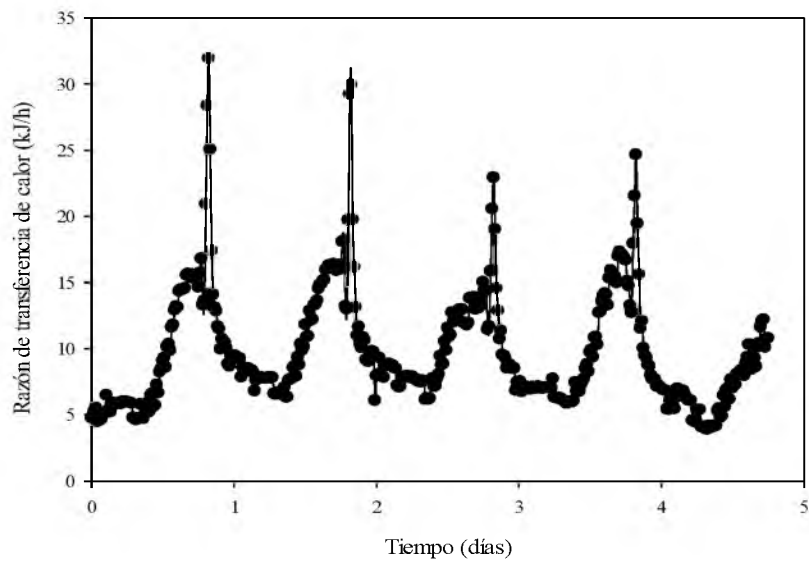


Figura 3.16. Razón de transferencia de calor al aire del reactor 3 para una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{materia seca}}^{-1}$, prueba 2.

3.6 Análisis comparativo

3.6.1 Temperatura de la materia orgánica

Durante las pruebas se observaron las distintas fases térmicas del proceso de compostaje con una etapa termófila en los primeros días del experimento, alcanzando valores máximos de 56,2 °C para la prueba 1 y 47,5 °C para la prueba 2, y una etapa mesófila al inicio del experimento y luego de alcanzar el pico térmico en la materia orgánica. Shemekite et al (2014) registraron temperaturas cercanas a los 60 °C para el tercer día de medición al realizar un compost mezclando pulpa de café con estiércol y desechos de vegetales y frutas a un contenido de humedad del 60 %. Arslan et al. (2011) obtuvieron para una tasa de aireación de 0,99 l min⁻¹ kg sólidos volátiles⁻¹ una temperatura máxima de 58 °C al utilizar una mezcla de vegetales y frutas para el proceso. Kulcu & Yaldiz (2004) al analizar el compostaje de productos agrícolas (contenido de humedad de 74,57 %) encontraron una temperatura máxima de 50 °C al día 6 de iniciado el experimento a una tasa de aireación de 0,40 l min⁻¹ kg materia orgánica⁻¹. Si consideramos otros residuos agrícolas como lo son los desechos en granjas, Guardia et al. (2008) consiguieron temperaturas cercanas a los 70 °C con tasas de aireación de 0,14 y 0,20 l min⁻¹ kg materia seca⁻¹ al estudiar una composta de cerdaza. Liu & Price (2011) evaluaron un sistema de compostaje con una mezcla de residuos y filtros de café, obteniendo una temperatura máxima de 57 °C manteniendo un contenido de humedad del 60 % en base húmeda.

En el experimento realizado se obtuvieron valores de temperatura similares a los encontrados por otros autores al realizar una composta con otras materias orgánicas. En las referencias observadas el contenido de humedad de la materia procesada no fue tan alta como el de la mezcla entre broza de café y borucha de madera; así mismo las tasas de aireación utilizadas fueron bastante menores a las utilizadas en este experimento. Estos factores afectaron directamente la temperatura que se alcanzó en la materia orgánica. Específicamente al trabajar con una alta tasa de aireación, el aire absorbe mayor cantidad de calor por unidad de tiempo, lo que provoca una disminución en la temperatura del medio.

3.6.2 Concentración de oxígeno

La concentración de oxígeno durante las dos pruebas realizadas se mantuvo arriba del 10 % sugerido por la literatura, siendo para la prueba 1 la concentración más baja de 14,7 % en el reactor dos, mientras que en la prueba 2 se obtuvo 15,3 %. Estos resultados permiten asegurar que existió una buena oxigenación en todo el reactor durante las pruebas, sin embargo cabe destacar que esto se debe a una alta tasa de aireación que supera las recomendadas por la literatura o que han sido utilizadas en otros experimentos. Por ejemplo, Ahn, Richard, & Choi (2007) al evaluar una composta de gallinaza a un flujo de aire alto ($0,46 \text{ l min}^{-1} \text{ kg sólidos volátiles}^{-1}$) y otro bajo ($0,14 \text{ l min}^{-1} \text{ kg sólidos volátiles}^{-1}$) obtuvieron una concentración de oxígeno superior al 10 % durante la prueba realizada, manteniendo un contenido de humedad cercano al 60%. Guo et al. (2012) evaluó tasas de aireación de 0,24, 0,48 y $0,72 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ manteniendo la concentración de oxígeno a más del 10 % con 0,48 y $0,72 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ en sus 40 días de evaluación. Durante las pruebas preliminares se evaluaron tasas de aireación dentro de estos rangos, sin embargo para los días analizados no se observó una concentración de oxígeno mayor al 10 %.

3.6.3 Razón de Transferencia de calor

La razón de transferencia de calor mantuvo la misma tendencia a lo largo de las dos pruebas realizadas en los reactores analizados, sin embargo se observa que para el reactor 1 en la prueba 1 se alcanzan valores más altos al resto de los reactores monitoreados. En el resto de los recipientes se observa una similitud entre los datos alcanzados que se mantienen en un rango entre 10 y 30 kJ/h. La razón de transferencia más alta fue de 50,20 kJ/h para la prueba 1 y 41,80 kJ/h para la prueba 2. Ghaly, Altoaik, & Snow (2006) obtuvieron un valor máximo de transferencia de calor al aire de 31,02 kJ/h a la temperatura máxima registrada durante la evaluación de un proceso de compostaje de residuos de plantas de tomate. Wang et al. (2016) simularon el proceso de compostaje de ensilaje de maíz y estiércol de ganado con una aireación pasiva entre 0,02 y $0,07 \text{ m}^3/\text{h}$, donde obtuvieron un valor promedio de transferencia de calor al aire de 0,864 kJ/h en 144 horas evaluadas.

3.7 Análisis estadístico

3.7.1 Temperatura de la materia orgánica

A continuación se muestran los resultados de realizar un análisis de varianza y un análisis de separación de medias de 0,05 % al comparar los valores de la temperatura de la materia orgánica en cada punto de medición de los reactores en las prueba 1 (cuadro 3.29) y 2 (cuadro 3.30). En las dos pruebas se observa que existen diferencias significativas entre las tres medias analizadas, sin embargo existe una similitud entre los resultados de 1 y 3, y 2 y 3.

Cuadro 3.29. Test de Tukey para la temperatura en los puntos de medición en la prueba 1.

Punto de medición	Temperatura Media (°C)			
1	33,39	±	9,09	A
2	38,09	±	7,59	B
3	36,88	±	5,28	AB

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Cuadro 3.30. Test de Tukey para la temperatura en los puntos de medición en la prueba 2.

Punto de medición	Temperatura Media (°C)			
1	31,55	±	6,56	A
2	36,82	±	6,79	B
3	34,85	±	6,54	AB

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Este resultado demuestra que el núcleo caliente (ubicado entre el punto 2 y 3) en la materia orgánica juega un papel determinante en la distribución de la temperatura a lo largo de toda la masa.

En los cuadros 3.31 y 3.32 se observa el mismo análisis para el tratamiento de los reactores en la prueba 1 y 2 respectivamente. Para una separación de medias de 0,05 % no

existen diferencias significativas en la temperatura alcanzada en los reactores en las pruebas realizadas.

Cuadro 3.31. Test de Tukey para la temperatura en los reactores en la prueba 1.

Reactor	Temperatura Media (°C)			
1	35,06	±	7,63	A
2	36,79	±	8,19	A
3	36,51	±	7,29	A

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Cuadro 3.32. Test de Tukey para la temperatura en los reactores en la prueba 2.

Reactor	Temperatura Media (°C)			
1	33,64	±	6,67	A
2	34,20	±	7,39	A
3	35,38	±	6,77	A

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Sin embargo al analizar esta misma variable entre las dos pruebas realizadas, podemos determinar que existen diferencias significativas entre ellas (cuadro 3.33).

Cuadro 3.33. Test de Tukey para la temperatura en los reactores entre prueba 1 y 2.

Prueba	Temperatura Media (°C)			
1	39,24	±	6,73	A
2	34,60	±	6,07	B

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

3.7.2 Concentración de oxígeno

Al realizar el análisis de varianza para el tratamiento de concentración de oxígeno, observamos en los cuadros 3.34 y 3.35 que no existen diferencias significativas entre los reactores para cada prueba realizada.

Cuadro 3.34. Test de Tukey para la concentración de oxígeno en los reactores, prueba 1.

Reactor	Oxígeno (%)			
1	19,19	±	0,93	A
2	18,23	±	1,66	A
3	18,20	±	1,42	A

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Cuadro 3.35. Test de Tukey para la concentración de oxígeno en los reactores, prueba 2.

Reactor	Oxígeno (%)			
1	19,43	±	0,78	A
2	18,18	±	1,74	A
3	18,23	±	1,70	A

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

Igualmente no existen diferencias significativas entre las pruebas realizadas (cuadro 3.36), lo que confirma una buena aireación a lo largo de las dos pruebas realizadas.

Cuadro 3.36. Test de Tukey para la concentración de oxígeno en los reactores, prueba 1 y 2.

Prueba	Oxígeno (%)			
1	18,06	±	1,62	A
2	18,61	±	1,54	A

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p>0,05$)

CONCLUSIONES

El sistema de compostaje tipo reactor con aireación forzada permite la evaluación y caracterización de distintos elementos del proceso de compostaje de la pulpa de café; manteniendo factores constantes para observar el comportamiento del sistema ante distintas condiciones.

La pulpa de café al ser una materia orgánica con alto contenido de humedad presenta limitantes a la hora de aplicar el proceso de compostaje, especialmente en la oxigenación de la masa. Debido a esta problemática se vuelve necesario mezclar la pulpa de café con algún agente de enmienda, que aumente la porosidad en la pila de compostaje y a la vez le dé un mayor sostén para evitar la compactación del material.

En experimentos previos realizados por distintos autores se recomiendan tasas de aireación entre $0,1$ y $1,0 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$, sin embargo las tasas evaluadas $0,18$, $0,44$ y $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$, presentaron limitantes de oxigenación en la materia orgánica (menores al 10 %) durante la investigación realizada. La tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ mantuvo las condiciones de oxígeno dentro del rango recomendado, proporcionando una buena oxigenación en la materia orgánica. Por lo tanto, bajo las condiciones evaluadas las tasas de aireación recomendadas por la literatura no satisfacen las necesidades para el desarrollo de un proceso eficiente.

Durante la evaluación del sistema de compostaje de la mezcla de pulpa de café y borucha de madera a una tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ se obtienen temperaturas más altas y por más tiempo respecto a la evaluación de la misma mezcla a $0,18$, $0,44$ y $0,70 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$; lo cual determina que una buena aireación en la mezcla repercute en un aumento en la temperatura de la materia orgánica.

La razón de transferencia de calor en este experimento se ve más influenciada por la temperatura ambiente del aire y la velocidad del flujo con la que pasa a través de la materia orgánica, que por el diferencial de temperatura del aire al pasar por la materia.

RECOMENDACIONES

Pese a que la tasa de aireación de $2,2 \text{ l min}^{-1} \text{ kg materia seca}^{-1}$ mantiene la concentración de oxígeno en valores superiores al 10 %, se deben evaluar distintas tasas de aireación con el fin de determinar con cuál de ellas se obtiene una temperatura y razón de transferencia de calor mayor a la encontrada en esta investigación. Se debe tomar en cuenta una aireación intermitente y escalonada ya que según lo observado en el experimento, se requiere una mayor oxigenación al inicio del experimento cuando se percibe el final de la fase mesófila y el inicio de la termófila, y una menor oxigenación cuando inicia la disminución en la temperatura de la materia orgánica.

Se deben evaluar otros agentes de enmienda, incluyendo materiales inorgánicos, que puedan mejorar las condiciones de la materia orgánica; siempre y cuando no alteren en demasía los rangos recomendados de los factores.

En relación con el contenido de humedad de la pulpa de café es recomendable realizar volteos del material con el fin de reducir su contenido de humedad a los rangos recomendados por la literatura. Asimismo la utilización de procesos de reducción del contenido de humedad menos agresivos e invasivos para los microorganismos mesófilos puede mejorar las condiciones iniciales del proceso.

Los mayores diferenciales de temperatura del aire que pasa a través de la materia orgánica se dieron cuando la temperatura ambiente era baja. Por lo tanto es recomendable la aplicación de este sistema en lugares más fríos con el fin de determinar si el diferencial de temperatura aumenta y por ende su utilización se vuelve más factible.

Debido a que la mayor cantidad de calor se encuentra contenido en la materia orgánica, es necesario realizar bajo las mismas condiciones una medición del calor absorbido mediante conducción por un serpentín colocado en el interior de la materia orgánica.

REFERENCIAS

- Ahn, H. K., Richard, T. L., & Choi, H. L. (2006). Mass and thermal balance during composting a poultry manure-wood shavings mixture at different aeration rates . *Process Biochemistry*, 42(2007), 215-223.
- Arslan, I., Ünlü, A., & Topal, M. (2011). Determination of the effect of aeration rate on composting of vegetable.fruit wastes. *Clean-Soil, Air, Water*, 39(11) 1012-1021.
- British Columbia Ministry of Agriculture and Food. (1996). *The Composting Process*. British Columbia.
- Calle, V. (1977). Subproductos del Café. *Boletín Técnico Cenicafé*, 12 (1977), 78-84.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Chen, L., de Haro Marti, M., Moore, A., & Falen, C. (2011). *The Composting Process*. Idaho: Universidad de Idaho.
- Cornell Composting*. (2007). Recuperado el 2016, de <http://compost.css.cornell.edu/science.html>
- Cuadros, S. (2007). *Compostaje y Biometanización*. Madrid: Escuela de Organización Industrial.
- Cuadros, S. (2008). *Residuos Agrícolas, Forestales y Lodos*. Madrid: Escuela de Organización Industrial.
- Ghaly, A. E., Alkoaik, F., & Snow, A. (2006). Thermal balance of invessel composting of tomato plant residues. *Canadian Biosystems Engineering*, 48(2006), 6.1-6.11.

- Gómez Acebo, T. (2004). *Mezcla de Gases Ideales. Aire Húmedo*. San Sebastián: Universidad de Navarra.
- Guardia, A., Petiot, C., & Rogeau, D. (2008). Influence of aeration and biodegradability fractionation on composting kinetics. *Waste Management*, 28(2008), 73-84.
- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y. (2012). Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*, 112(2012), 171-178.
- Haug, R. T. (1980). *Compost Engineering, Principles and Practice*. Estados Unidos: Ann Arbor Science.
- Kulcu, R., & Yaldiz, O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 93(2004), 49-57.
- Laos, F. (2003). *Compostaje de residuos orgánicos de actividades productivas y urbanas en la región Andino-Patagónica: determinación de índices de madurez para su utilización agronómica*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Comahue, Argentina.
- Liu, K., & Price, K. (2011). Evaluation of three composting systems for the management of spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, 112 (2011), 7966-7974.
- Marques Pereira, J. A., & Marcal de Queiroz, D. (1991). *Principios de secado de granos psicometria higroscopica*. Santiago: FAO.
- Moreno Casco, J., & Moral Herrero, R. (2008). *Compostaje*. Madrid: Mundi Prensa.
- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., & Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29 (2009), 570-573.

- Rodríguez Valencia, N., & Zambrano Franco, D. (2010). Los Subproductos del Café: Fuente de Energía Renovable. *Avances Técnicos CENICAFE*, 393 (2010) 1-8.
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor*. Santiago: FAO.
- Rougeron, C. (1977). *Aislamiento Acústico y Térmico en la Construcción*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A.
- Schuler, C. A. (1986). *Electrónica, Principios y Aplicaciones*. Nueva York: McGraw-Hill, Inc.
- Shemekite, F., Gómez Brandón, M., Franke White, I., Praehauser, B., Insam, H., & Assefa, F. (2014). Coffee husk composting: An investigation of the process using molecular and non-molecular tools. *Waste Management*, 34(2014), 642-652.
- Soto, G., & Muñoz, C. (2002). Consideraciones teóricas y prácticas sobre el compost, y su empleo en la agricultura orgánica. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 65(2002), 123-129.
- Sztern, D., & Pravia, M. (1999). *Manual para la Elaboración de Compost, Bases Conceptuales y Procedimientos*. Montevideo: Organización Panamericana de la Salud.
- Vining, M. A. (2002). *Bench-Scale Compost Reactors System and The Self-Heating Capabilities (Tesis de maestría)*. Universidad del Estado de Louisiana, Texas, Estados Unidos. Recuperada de http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-1101102-142703/unrestricted/Vining_thesis.pdf.
- Wang, Y., Pang, L., Liu, X., Wang, Y., Zhou, K., & Luo, F. (2016). Using thermal balance model to determine optimal reactor volume and insulation material needed in laboratory- scale composting reactor. *Bioresource Technology*, 206 (2016) 164-172.

Anexo 1

Cuadro 0.1 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 1, prueba 1.

Tiempo (Días)	T _{sal} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sal} (%)	P _{vap} (kPa)	O _{cal} (kg v./kg a.s.)	h _{sal} (kJ/kg)	V _{h sal} (m ³ /kg a.s.)	ρ _{sal} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vap} (kPa)	O _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sal} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s.)	ρ _{ent} (kg a.h/m ³)	ρ _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
0,00	27,35	3,60	90,04	3,24	0,024	88,45	1,02	1,00	19,10	2,21	74,80	1,65	0,012	49,58	38,87	0,97	1,04	1,02	1,34E-04	1,37E-04	19,15
0,21	23,79	3,00	85,94	2,58	0,019	71,94	1,00	1,02	18,23	2,09	73,28	1,53	0,011	46,33	25,61	0,97	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	12,73
0,42	28,43	3,82	88,32	3,37	0,025	92,07	1,03	1,00	24,13	3,00	62,14	1,87	0,014	58,72	33,35	0,99	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	16,25
0,63	32,30	4,80	89,42	4,29	0,032	114,44	1,05	0,98	27,39	3,60	58,37	2,10	0,015	66,55	47,89	1,01	1,01	1,00	1,34E-04	1,33E-04	23,00
0,83	31,72	4,80	91,31	4,38	0,033	115,63	1,05	0,98	20,47	2,34	69,47	1,62	0,012	50,43	65,21	0,98	1,03	1,01	1,34E-04	1,35E-04	31,75
1,04	29,07	4,03	90,95	3,67	0,027	98,56	1,03	1,00	19,40	2,21	75,70	1,67	0,012	50,26	48,31	0,98	1,04	1,02	1,34E-04	1,36E-04	23,70
1,25	27,48	3,60	91,31	3,29	0,024	89,46	1,02	1,00	18,40	2,09	74,66	1,56	0,011	47,04	42,42	0,97	1,04	1,02	1,34E-04	1,37E-04	20,92
1,46	30,91	4,52	92,22	4,17	0,031	110,54	1,04	0,99	24,84	3,17	65,01	2,06	0,015	63,12	47,42	1,00	1,02	1,00	1,34E-04	1,34E-04	22,93
1,67	33,99	5,35	92,27	4,94	0,037	129,33	1,06	0,97	35,78	5,98	42,82	2,56	0,019	84,03	45,29	1,04	0,98	0,98	1,34E-04	1,31E-04	21,35
1,88	28,22	3,82	92,70	3,54	0,026	95,13	1,03	1,00	21,45	2,51	74,40	1,86	0,014	55,91	39,23	0,98	1,03	1,01	1,34E-04	1,36E-04	19,20
2,08	26,75	3,60	93,38	3,36	0,025	90,15	1,02	1,01	19,70	2,34	74,33	1,74	0,013	51,76	38,39	0,98	1,04	1,02	1,34E-04	1,37E-04	18,91
2,29	26,24	3,38	93,38	3,16	0,023	85,69	1,02	1,01	19,65	2,34	74,99	1,75	0,013	52,00	33,70	0,98	1,04	1,02	1,34E-04	1,37E-04	16,62
2,50	31,35	4,52	93,38	4,22	0,031	112,07	1,05	0,99	27,14	3,60	60,33	2,17	0,016	67,62	44,45	1,01	1,01	1,00	1,34E-04	1,34E-04	21,39

(Continúa)

Tiempo (Días)	T _{sat} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sat} (%)	P _{vp} (kPa)	O _{sat} (kg v./kg a.s.)	h _{sat} (kJ/kg)	V _{h sat} (m ³ /kg a.s)	P _{sat} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vp} (kPa)	O _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sat} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s)	ρ _{ent} (kg a.h/m ³)	ρ _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
2,71	40,35	7,38	93,38	6,89	0,053	177,22	1,11	0,95	31,26	4,52	47,54	2,15	0,016	71,47	105,75	1,02	1,00	0,97	1,34E-04	1,30E-04	49,53
2,92	28,63	4,03	93,38	3,76	0,028	100,04	1,03	1,00	22,75	2,84	69,22	1,96	0,014	59,14	40,91	0,99	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	19,95
3,13	26,54	3,60	93,38	3,36	0,025	89,93	1,02	1,01	21,05	2,51	70,05	1,75	0,013	53,45	36,48	0,98	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	17,93
3,33	27,91	3,82	93,38	3,56	0,026	95,32	1,03	1,00	21,82	2,67	71,51	1,91	0,014	57,17	38,16	0,99	1,03	1,01	1,34E-04	1,36E-04	18,67
3,54	34,31	5,35	93,38	5,00	0,038	130,89	1,07	0,97	26,26	3,38	66,82	2,26	0,016	68,42	62,47	1,00	1,01	0,99	1,34E-04	1,33E-04	29,91
3,75	29,53	4,25	93,38	3,97	0,029	104,98	1,04	0,99	23,93	3,00	71,51	2,15	0,016	63,83	41,15	1,00	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	19,98
3,96	26,70	3,60	93,38	3,36	0,025	90,09	1,02	1,01	21,92	2,67	76,99	2,06	0,015	60,03	30,06	0,99	1,03	1,02	1,34E-04	1,36E-04	14,74
4,17	23,47	2,84	93,38	2,65	0,019	72,92	1,00	1,02	19,60	2,34	71,57	1,67	0,012	50,45	22,47	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	11,15
4,38	27,43	3,60	93,38	3,36	0,025	90,87	1,02	1,00	22,02	2,67	64,75	1,73	0,013	53,98	36,89	0,98	1,03	1,02	1,34E-04	1,36E-04	18,07
4,58	30,65	4,52	93,38	4,22	0,031	111,31	1,04	0,99	24,99	3,17	67,15	2,13	0,015	64,57	46,75	1,00	1,02	1,00	1,34E-04	1,34E-04	22,61
4,79	26,85	3,60	93,38	3,36	0,025	90,25	1,02	1,00	23,50	3,00	72,83	2,19	0,016	64,15	26,11	0,99	1,02	1,01	1,34E-04	1,36E-04	12,76
5,00	24,21	3,00	93,38	2,80	0,021	76,67	1,00	1,02	20,57	2,51	75,79	1,90	0,014	55,66	21,01	0,98	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	10,39

Cuadro 0.2 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 2, prueba 1.

Tiempo (Días)	T _{sat} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sat} (%)	P _{vap} (kPa)	ω _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{sal} (kJ/kg)	V _{h sal} (m ³ /kg a.s.)	ρ _{sal} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vap} (kPa)	ω _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sal} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s.)	ρ _{ent} (kg a.h/m ³)	ρ _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
0,00	24,37	3,003	90,62	2,72	0,020	75,26	1,00	1,02	19,10	2,21	74,80	1,65	0,01	49,58	25,68	0,97	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	12,73
0,21	22,33	2,671	93,14	2,49	0,018	68,65	0,99	1,02	18,23	2,09	73,28	1,53	0,01	46,33	22,33	0,97	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	11,13
0,42	28,14	3,8152	95,81	3,66	0,027	97,40	1,03	1,00	24,13	3,00	62,14	1,87	0,01	58,72	38,68	0,99	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	18,84
0,63	31,51	4,7984	94,26	4,52	0,034	118,28	1,05	0,98	27,39	3,60	58,37	2,10	0,02	66,55	51,74	1,01	1,01	1,00	1,34E-04	1,34E-04	24,87
0,83	26,34	3,3844	95,71	3,24	0,024	87,35	1,02	1,01	20,47	2,34	69,47	1,62	0,01	50,43	36,92	0,98	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	18,18
1,04	24,86	3,169	96,55	3,06	0,022	82,31	1,01	1,01	19,40	2,21	75,70	1,67	0,01	50,26	32,05	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,37E-04	15,85
1,25	23,49	2,837	97,45	2,76	0,020	75,18	1,00	1,02	18,40	2,09	74,66	1,56	0,01	47,04	28,14	0,97	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	13,99
1,46	27,74	3,8152	100,00	3,82	0,028	100,13	1,03	1,00	24,84	3,17	65,01	2,06	0,01	63,12	37,01	1,00	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	18,01
1,67	29,66	4,246	94,19	4,00	0,030	105,82	1,04	0,99	35,78	5,98	42,82	2,56	0,02	84,03	21,79	1,04	0,98	0,99	1,34E-04	1,32E-04	10,36
1,88	22,72	2,837	96,42	2,74	0,020	73,80	1,00	1,02	21,45	2,51	74,40	1,86	0,01	55,91	17,89	0,98	1,03	1,03	1,34E-04	1,37E-04	8,85
2,08	21,84	2,671	96,37	2,57	0,019	69,80	0,99	1,03	19,70	2,34	74,33	1,74	0,01	51,76	18,04	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	8,97
2,29	21,46	2,505	97,32	2,44	0,018	66,79	0,99	1,03	19,65	2,34	74,99	1,75	0,01	52,00	14,79	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	7,37
2,50	28,34	3,8152	100,00	3,82	0,028	100,77	1,03	1,00	27,14	3,60	60,33	2,17	0,02	67,62	33,16	1,01	1,01	1,00	1,34E-04	1,34E-04	16,05

(Continúa)

Tiempo (Días)	T _{sat} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sat} (%)	P _{vap} (kPa)	O _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{sal} (kJ/kg)	V _{h sal} (m ³ /kg a.s.)	P _{sal} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vap} (kPa)	O _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sal} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s.)	P _{ent} (kg a.h/m ³)	P _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
2,71	36,31	5,9778	97,25	5,81	0,044	149,95	1,08	0,96	31,26	4,52	47,54	2,15	0,02	71,47	78,48	1,02	1,00	0,98	1,34E-04	1,31E-04	37,08
2,92	23,40	2,837	96,46	2,74	0,020	74,53	1,00	1,02	22,75	2,84	69,22	1,96	0,01	59,14	15,40	0,99	1,02	1,02	1,34E-04	1,37E-04	7,59
3,13	21,17	2,505	97,29	2,44	0,018	66,48	0,99	1,03	21,05	2,51	70,05	1,75	0,01	53,45	13,03	0,98	1,03	1,03	1,34E-04	1,38E-04	6,47
3,33	23,40	2,837	98,52	2,79	0,020	75,66	1,00	1,02	21,82	2,67	71,51	1,91	0,01	57,17	18,49	0,99	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	9,13
3,54	31,30	4,5222	100,00	4,52	0,034	118,05	1,05	0,99	26,26	3,38	66,82	2,26	0,02	68,42	49,63	1,00	1,01	1,00	1,34E-04	1,34E-04	23,90
3,75	25,65	3,3844	95,68	3,24	0,024	86,60	1,01	1,01	23,93	3,00	71,51	2,15	0,02	63,83	22,77	1,00	1,02	1,01	1,34E-04	1,36E-04	11,14
3,96	22,43	2,671	96,41	2,58	0,019	70,42	1,00	1,02	21,92	2,67	76,99	2,06	0,01	60,03	10,39	0,99	1,03	1,03	1,34E-04	1,37E-04	5,14
4,17	19,14	2,2124	96,20	2,13	0,015	58,52	0,98	1,04	19,60	2,34	71,57	1,67	0,01	50,45	8,07	0,98	1,04	1,04	1,34E-04	1,39E-04	4,04
4,38	24,86	3,169	100,00	3,17	0,023	84,43	1,01	1,01	22,02	2,67	64,75	1,73	0,01	53,98	30,45	0,98	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	14,99
4,58	28,34	3,8152	100,00	3,82	0,028	100,77	1,03	1,00	24,99	3,17	67,15	2,13	0,02	64,57	36,20	1,00	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	17,59
4,79	24,08	3,003	97,49	2,93	0,021	78,93	1,01	1,02	23,50	3,00	72,83	2,19	0,02	64,15	14,78	0,99	1,02	1,02	1,34E-04	1,37E-04	7,26
5,00	21,84	2,671	100,00	2,67	0,020	71,65	0,99	1,02	20,57	2,51	75,79	1,90	0,01	55,66	15,99	0,98	1,03	1,03	1,34E-04	1,38E-04	7,94

Cuadro 0.3 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 3, prueba 1.

Tiempo (Días)	T _{sal} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sal} (%)	P _{vap} (kPa)	G _{cal} (kg v./kg a.s.)	h _{sal} (kJ/kg)	V _{h sal} (m ³ /kg a.s)	P _{sal} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vap} (kPa)	G _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sal} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s)	P _{ent} (kg a.h/m ³)	P _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
0,000	24,89	3,169	94,851	3,006	0,022	81,29	1,01	1,013	19,101	2,212	75,175	1,663	0,012	49,73	31,55	0,97	1,04	1,03	1,34E-04	1,37E-04	15,62
0,208	22,22	2,671	95,608	2,554	0,019	69,80	0,99	1,024	18,230	2,086	73,690	1,537	0,011	46,48	23,31	0,97	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	11,62
0,417	26,79	3,600	97,956	3,526	0,026	93,43	1,02	1,004	24,132	3,003	62,747	1,884	0,014	59,07	34,37	0,99	1,02	1,01	1,34E-04	1,36E-04	16,78
0,625	29,23	4,031	98,947	3,988	0,030	105,14	1,04	0,994	27,393	3,600	59,051	2,126	0,015	67,01	38,14	1,01	1,01	1,00	1,34E-04	1,34E-04	18,42
0,833	23,30	2,837	97,748	2,773	0,020	75,13	1,00	1,019	20,472	2,339	69,945	1,636	0,012	50,64	24,50	0,98	1,03	1,03	1,34E-04	1,38E-04	12,14
1,042	21,73	2,671	97,623	2,608	0,019	70,31	0,99	1,026	19,400	2,212	76,063	1,683	0,012	50,41	19,91	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	9,91
1,250	21,43	2,505	97,590	2,445	0,018	66,90	0,99	1,027	18,405	2,086	75,042	1,565	0,011	47,19	19,71	0,97	1,04	1,03	1,34E-04	1,39E-04	9,84
1,458	26,89	3,600	98,947	3,562	0,026	94,24	1,02	1,004	24,840	3,169	65,563	2,078	0,015	63,45	30,79	1,00	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	15,01
1,667	30,68	4,522	98,239	4,443	0,033	115,78	1,05	0,987	35,777	5,978	43,781	2,617	0,019	85,14	30,64	1,04	0,98	0,98	1,34E-04	1,32E-04	14,53
1,875	23,79	3,003	94,809	2,847	0,021	77,08	1,00	1,017	21,445	2,505	74,787	1,873	0,014	56,09	20,99	0,98	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	10,36
2,083	23,00	2,837	93,918	2,664	0,019	72,74	1,00	1,021	19,698	2,339	74,715	1,748	0,013	51,93	20,81	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	10,33
2,292	22,81	2,837	94,726	2,687	0,020	72,97	1,00	1,022	19,649	2,339	75,366	1,763	0,013	52,16	20,81	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	10,33
2,500	29,23	4,031	96,008	3,870	0,029	102,79	1,03	0,995	27,135	3,600	60,969	2,195	0,016	68,05	34,74	1,01	1,01	1,00	1,34E-04	1,34E-04	16,79

(Continúa)

Tiempo (Días)	Tsal (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sal} (%)	P _{vap} (kPa)	O _{sal} (kg v./kg a.s.)	h _{sal} (kJ/kg)	V _{h sal} (m ³ /kg a.s.)	P _{sal} (kg a.h/m ³)	T amb (°C)	Psat (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{sup} (kPa)	O _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sal} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s.)	P _{ent} (kg a.h/m ³)	P _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
2,708	36,26	5,978	97,640	5,837	0,044	150,38	1,08	0,964	31,259	4,522	48,413	2,189	0,016	72,22	78,16	1,02	1,00	0,98	1,34E-04	1,31E-04	36,93
2,917	25,29	3,169	95,791	3,036	0,022	82,28	1,01	1,011	22,747	2,837	69,697	1,977	0,014	59,39	22,89	0,99	1,02	1,02	1,34E-04	1,36E-04	11,24
3,125	23,00	2,837	93,135	2,642	0,019	72,31	1,00	1,021	21,045	2,505	70,517	1,766	0,013	53,67	18,64	0,98	1,03	1,03	1,34E-04	1,38E-04	9,23
3,333	24,79	3,169	94,826	3,005	0,022	81,17	1,01	1,013	21,820	2,671	71,946	1,922	0,014	57,39	23,78	0,99	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	11,71
3,542	32,04	4,798	94,359	4,528	0,034	118,95	1,05	0,983	26,264	3,384	67,341	2,279	0,017	68,76	50,19	1,01	1,01	1,00	1,34E-04	1,34E-04	24,14
3,750	28,00	3,815	88,889	3,391	0,025	92,07	1,02	1,001	23,930	3,003	71,946	2,161	0,016	64,08	27,98	1,00	1,02	1,01	1,34E-04	1,35E-04	13,64
3,958	25,09	3,169	97,856	3,101	0,023	83,34	1,01	1,012	21,920	2,671	77,327	2,065	0,015	60,20	23,14	0,99	1,03	1,02	1,34E-04	1,37E-04	11,38
4,167	21,43	2,505	97,590	2,445	0,018	66,90	0,99	1,027	19,599	2,339	72,008	1,684	0,012	50,64	16,26	0,98	1,04	1,03	1,34E-04	1,38E-04	8,10
4,375	26,19	3,384	98,947	3,349	0,025	89,32	1,02	1,007	22,021	2,671	65,311	1,744	0,013	54,26	35,06	0,98	1,03	1,02	1,34E-04	1,36E-04	17,21
4,583	29,74	4,246	98,947	4,201	0,031	109,94	1,04	0,991	24,993	3,169	67,668	2,144	0,016	64,88	45,06	1,00	1,02	1,00	1,34E-04	1,35E-04	21,82
4,792	25,88	3,384	98,947	3,349	0,025	89,01	1,02	1,008	23,502	3,003	73,249	2,200	0,016	64,38	24,62	0,99	1,02	1,01	1,34E-04	1,36E-04	12,05
5,000	23,00	2,837	98,889	2,805	0,021	75,45	1,00	1,020	20,571	2,505	76,147	1,907	0,014	55,83	19,62	0,98	1,03	1,03	1,34E-04	1,38E-04	9,71

Cuadro 0.4 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 1, prueba 2.

Tiempo (Días)	T _{sat} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sat} (%)	P _{vap} (kPa)	Q _{cal} (kg v./kg a.s.)	h _{sat} (kJ/kg)	V _{h sat} (m ³ /kg a.s)	P _{sal} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vap} (kPa)	Q _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sat} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s)	P _{ent} (kg a.h/m ³)	P _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
0,00	25,69	3,3844	93,38	3,16	0,023	85,13	1,01	1,01	25,40	3,169	58,94	1,868	0,0135	60,06	25,07	1,00	1,02	1,01	1,15E-04	1,16E-04	10,51
0,21	22,25	2,671	93,38	2,49	0,018	68,70	0,99	1,02	19,05	2,212	73,27	1,621	0,0117	48,90	19,80	0,97	1,04	1,03	1,15E-04	1,19E-04	8,46
0,42	23,12	2,837	93,38	2,65	0,019	72,57	1,00	1,02	19,99	2,339	72,54	1,697	0,0123	51,28	21,29	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,18E-04	9,06
0,63	30,39	4,246	93,38	3,97	0,029	105,91	1,04	0,99	26,79	3,600	55,84	2,010	0,0146	64,19	41,72	1,00	1,01	1,00	1,15E-04	1,15E-04	17,28
0,83	35,79	5,9778	93,38	5,58	0,042	144,58	1,08	0,97	26,41	3,384	55,88	1,891	0,0137	61,55	83,03	1,00	1,01	0,99	1,15E-04	1,14E-04	34,01
1,04	26,52	3,5998	93,38	3,36	0,025	89,92	1,02	1,01	20,61	2,505	70,04	1,755	0,0127	53,00	36,93	0,98	1,03	1,02	1,15E-04	1,17E-04	15,59
1,25	24,51	3,169	93,38	2,96	0,022	79,99	1,01	1,01	18,78	2,212	72,31	1,600	0,0116	48,22	31,77	0,97	1,04	1,03	1,15E-04	1,18E-04	13,51
1,46	26,12	3,3844	93,38	3,16	0,023	85,58	1,02	1,01	21,70	2,671	66,74	1,783	0,0129	54,65	30,93	0,98	1,03	1,02	1,15E-04	1,17E-04	13,05
1,67	31,62	4,7984	93,38	4,48	0,033	117,55	1,05	0,98	28,01	3,815	52,25	1,993	0,0145	65,14	52,41	1,01	1,01	1,00	1,15E-04	1,14E-04	21,60
1,88	28,68	4,0306	93,38	3,76	0,028	100,12	1,03	1,00	23,24	2,837	60,79	1,725	0,0125	55,15	44,97	0,99	1,02	1,01	1,15E-04	1,16E-04	18,82
2,08	25,49	3,169	93,38	2,96	0,022	81,01	1,01	1,01	20,16	2,339	69,51	1,626	0,0117	50,13	30,89	0,98	1,04	1,02	1,15E-04	1,18E-04	13,08
2,29	24,26	3,003	93,38	2,80	0,021	76,74	1,00	1,02	19,05	2,212	73,45	1,625	0,0117	48,97	27,77	0,97	1,04	1,03	1,15E-04	1,18E-04	11,81
2,50	27,23	3,5998	93,38	3,36	0,025	90,67	1,02	1,00	23,34	2,837	61,71	1,751	0,0127	55,74	34,93	0,99	1,02	1,01	1,15E-04	1,17E-04	14,66

(Continúa)

Tiempo (Días)	5,00	22,75	2,837	93,38	2,65	0,019	72,18	1,00	1,02	19,97	2,339	70,85	1,657	0,0120	50,51	21,67	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,15E-04	1,18E-04	9,23
T _{sat} (°C)	4,79	28,09	3,8152	93,38	3,56	0,026	95,53	1,03	1,00	28,79	4,031	46,78	1,885	0,0137	63,89	31,64	1,01	1,00	1,00	1,15E-04	1,15E-04	1,15E-04	13,13
P _{sat} (kPa)	4,58	26,47	3,3844	93,38	3,16	0,023	85,95	1,02	1,01	24,57	3,169	61,81	1,959	0,0142	60,92	25,02	1,00	1,02	1,01	1,15E-04	1,15E-04	1,16E-04	10,49
HR _{sat} (%)	4,38	21,63	2,671	93,38	2,49	0,018	68,05	0,99	1,03	18,73	2,212	76,71	1,697	0,0123	49,99	18,06	0,97	1,04	1,03	1,15E-04	1,15E-04	1,19E-04	7,73
P _{vap} (kPa)	4,17	23,04	2,837	93,38	2,65	0,019	72,49	1,00	1,02	19,92	2,339	73,44	1,718	0,0124	51,60	20,89	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,15E-04	1,18E-04	8,90
h _{sat} (kJ/kg)	3,96	24,11	3,003	93,38	2,80	0,021	76,58	1,00	1,02	20,61	2,505	69,17	1,733	0,0125	52,59	23,99	0,98	1,03	1,02	1,15E-04	1,15E-04	1,18E-04	10,18
h _{sat-h_{ent}} (kJ/kg)	3,75	30,33	4,246	93,38	3,97	0,029	105,86	1,04	0,99	27,96	3,815	50,12	1,912	0,0139	63,55	42,31	1,01	1,01	1,00	1,15E-04	1,15E-04	1,15E-04	17,50
V _{ent} (m ³ /kg a.s.)	3,54	26,72	3,5998	93,38	3,36	0,025	90,14	1,02	1,01	24,19	3,003	60,35	1,812	0,0131	57,77	32,37	0,99	1,02	1,01	1,15E-04	1,15E-04	1,16E-04	13,57
P _{amb} (°C)	3,33	22,65	2,837	93,38	2,65	0,019	72,08	1,00	1,02	19,01	2,212	74,00	1,637	0,0118	49,15	22,93	0,97	1,04	1,03	1,15E-04	1,15E-04	1,19E-04	9,79
P _{sat} (kPa)	3,13	23,74	3,003	93,38	2,80	0,021	76,19	1,00	1,02	19,79	2,339	71,38	1,670	0,0121	50,57	25,63	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,15E-04	1,18E-04	10,90
HR _{ent} (%)	2,92	26,29	3,3844	93,38	3,16	0,023	85,76	1,02	1,01	22,39	2,671	66,77	1,783	0,0129	55,38	30,38	0,99	1,03	1,02	1,15E-04	1,15E-04	1,17E-04	12,80
P _{ent} (kPa)	2,71	30,46	4,246	93,38	3,97	0,029	105,99	1,04	0,99	27,63	3,815	56,28	2,147	0,0156	67,66	38,33	1,01	1,01	1,00	1,15E-04	1,15E-04	1,15E-04	15,85
V _{sat} (m ³ /kg a.s.)																							
P _{sat} (kJ/m ³)																							
h _{sat} (kg a.s.)																							
h _{sat-h_{ent}} (kg a.s.)																							
V _{ent} (kg a.s.)																							
P _{ent} (kg a.h/m ³)																							
P _{prom} (kg a.h/m ³)																							
Filjo Volumétrico (m ³ /s)																							
Filjo Násico (kg/s)																							
Razón de Transferencia (kJ/h)																							

Cuadro 0.5 Resumen de razón de transferencia de calor del reactor 3, prueba 2.

Tiempo (Días)	T _{sal} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sal} (%)	P _{vap} (kPa)	ω _{sal} (kg v./kg a.s.)	h _{sal} (kJ/kg)	V _{h sal} (m ³ /kg a.s)	ρ _{sal} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vap} (kPa)	ω _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sal} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s)	P _{ent} (kg a.h/m ³)	ρ _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
0,00	26,69	3,5998	66,60	2,40	0,0175	71,458	1,01	1,01	25,40	3,169	58,94	1,87	0,01	60,06	11,40	1,00	1,02	1,01	1,15E-04	1,16E-04	4,78
0,21	19,77	2,339	98,95	2,31	0,0169	62,688	0,98	1,03	19,05	2,2124	73,27	1,63	0,01	49,07	13,62	0,97	1,04	1,04	1,15E-04	1,19E-04	5,85
0,42	20,55	2,505	98,95	2,48	0,0181	66,626	0,99	1,03	19,99	2,339	72,54	1,71	0,01	51,46	15,16	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,19E-04	6,49
0,63	27,80	3,8152	98,95	3,78	0,0280	99,403	1,03	1,00	26,79	3,5998	55,84	2,04	0,01	64,68	34,72	1,00	1,01	1,01	1,15E-04	1,16E-04	14,45
0,83	31,93	4,7984	98,35	4,72	0,0354	122,71	1,05	0,98	26,41	3,3844	55,88	1,92	0,01	62,01	60,70	1,00	1,01	1,00	1,15E-04	1,15E-04	25,06
1,04	22,51	2,837	98,95	2,81	0,0206	74,965	1,00	1,02	20,61	2,505	70,04	1,77	0,01	53,21	21,75	0,98	1,03	1,03	1,15E-04	1,18E-04	9,25
1,25	20,74	2,505	98,71	2,47	0,0180	66,719	0,99	1,03	18,78	2,2124	72,31	1,61	0,01	48,40	18,32	0,97	1,04	1,04	1,15E-04	1,19E-04	7,85
1,46	23,10	2,837	98,95	2,81	0,0206	75,584	1,00	1,02	21,70	2,671	66,74	1,80	0,01	54,91	20,67	0,98	1,03	1,02	1,15E-04	1,18E-04	8,77
1,67	29,13	4,0306	98,95	3,99	0,0296	105,03	1,04	0,99	28,01	3,8152	52,25	2,02	0,01	65,71	39,33	1,01	1,01	1,00	1,15E-04	1,15E-04	16,29
1,88	24,89	3,169	97,85	3,10	0,0228	83,127	1,01	1,01	23,24	2,837	60,79	1,74	0,01	55,48	27,64	0,99	1,02	1,02	1,15E-04	1,17E-04	11,66
2,08	21,82	2,671	98,95	2,64	0,0193	71,093	0,99	1,03	20,16	2,339	69,51	1,64	0,01	50,34	20,76	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,18E-04	8,85
2,29	20,65	2,505	98,95	2,48	0,0181	66,729	0,99	1,03	19,05	2,2124	73,45	1,63	0,01	49,14	17,59	0,97	1,04	1,03	1,15E-04	1,19E-04	7,53
2,50	24,59	3,169	98,95	3,14	0,0231	83,49	1,01	1,01	23,34	2,837	61,71	1,77	0,01	56,07	27,43	0,99	1,02	1,02	1,15E-04	1,17E-04	11,57

(Continúa)

Tiempo (Días)	T _{sat} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{sat} (%)	P _{vap} (kPa)	O _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{sal} (kJ/kg)	V _{h sal} (m ³ /kg a.s.)	ρ _{sal} (kg a.h/m ³)	T _{amb} (°C)	P _{sat} (kPa)	HR _{ent} (%)	P _{vap} (kPa)	O _{ent} (kg v./kg a.s.)	h _{ent} (kJ/kg)	h _{sal} -h _{ent} (kJ/kg)	V _{h ent} (m ³ /kg a.s.)	ρ _{ent} (kg a.h/m ³)	ρ _{prom} (kg a.h/m ³)	Flujo Volumétrico (m ³ /s)	Flujo Másico (kg/s)	Razón de Transferencia (kJ/h)
2,71	28,21	3,8152	98,95	3,78	0,0280	99,833	1,03	1,00	27,63	3,8152	56,28	2,17	0,02	68,18	31,65	1,01	1,01	1,00	1,15E-04	1,15E-04	13,14
2,92	23,30	2,837	98,95	2,81	0,0206	75,789	1,00	1,02	22,39	2,671	66,77	1,80	0,01	55,64	20,15	0,99	1,03	1,02	1,15E-04	1,18E-04	8,53
3,13	21,04	2,505	98,95	2,48	0,0181	67,136	0,99	1,03	19,79	2,339	71,38	1,68	0,01	50,76	16,38	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,19E-04	7,00
3,33	20,06	2,339	98,95	2,31	0,0169	62,993	0,98	1,03	19,01	2,2124	74,00	1,65	0,01	49,31	13,68	0,97	1,04	1,04	1,15E-04	1,19E-04	5,87
3,54	25,09	3,169	98,95	3,14	0,0231	84,012	1,01	1,01	24,19	3,003	60,35	1,83	0,01	58,13	25,88	0,99	1,02	1,02	1,15E-04	1,17E-04	10,89
3,75	28,51	4,0306	98,95	3,99	0,0296	104,38	1,03	1,00	27,96	3,8152	50,12	1,94	0,01	64,15	40,24	1,01	1,01	1,00	1,15E-04	1,15E-04	16,69
3,96	21,53	2,671	98,95	2,64	0,0193	70,786	0,99	1,03	20,61	2,505	69,17	1,74	0,01	52,81	17,97	0,98	1,03	1,03	1,15E-04	1,18E-04	7,66
4,17	20,84	2,505	98,95	2,48	0,0181	66,932	0,99	1,03	19,92	2,339	73,44	1,73	0,01	51,77	15,16	0,98	1,04	1,03	1,15E-04	1,19E-04	6,48
4,38	19,18	2,2124	98,95	2,19	0,0159	59,707	0,98	1,04	18,73	2,2124	76,71	1,70	0,01	50,13	9,57	0,97	1,04	1,04	1,15E-04	1,19E-04	4,12
4,58	24,49	3,003	98,95	2,97	0,0218	80,202	1,01	1,01	24,57	3,169	61,81	1,98	0,01	61,29	18,91	1,00	1,02	1,02	1,15E-04	1,17E-04	7,96
4,75	25,99	3,3844	98,95	3,35	0,0247	89,111	1,02	1,01	26,38	3,3844	57,98	1,99	0,01	63,30	25,81	1,00	1,01	1,01	1,15E-04	1,16E-04	10,79