

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
Maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad



Biorreactor para la gestión integral de residuos biodegradables producidos en el ITESO

TESIS que para obtener el **GRADO** de
MAESTRA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD

Presenta: **ING. KARLA SOFÍA SOLTERO MERCADO**

Tutor **DR. LUIS DAVID RIZO DECELIS**

Tlaquepaque, Jalisco. 13 de mayo de 2022.

RESUMEN

El Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), reafirmando su compromiso social y ambiental, desea crear un programa de gestión integral de sus residuos biodegradables para reducir el volumen de desechos enviados a rellenos sanitarios. Lo anterior se pretende lograr gracias a la producción de composta mediante un sistema de compostaje cerrado.

En el presente Trabajo de Obtención de Grado (TOG) se recopila la información generada durante las primeras pruebas en biorreactores de 200 y 300 L, para finalmente dar pie a las pruebas en el biorreactor de 10,000 L. Esto con el objetivo de determinar las características que deberán de poseer los materiales de entrada y las acciones a realizarse a lo largo del proceso de compostaje para asegurar que el producto final pueda ser empleado en las áreas verdes de la institución.

CONTENIDO

1. Fundamentación	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos	11
1.4 Alcance.....	12
1.5 Desarrollo conceptual.....	14
1.6 Hipótesis.....	16
2. Marco conceptual	16
3. Marco metodológico de la investigación.....	23
3.1 Metodología de la investigación general.....	23
3.2 Metodología de la contribución individual.....	25
4. Estrategia de investigación.....	29
4.1 Modelado en 3D y manual de construcción del biorreactor.....	29
4.2 Análisis estadístico del proceso.....	30
4.3 Análisis de <i>Confiabilidad</i>	31
4.4 Desafíos.....	32
5. Exposición de hallazgos.....	40
5.1 Primer lote: Prototipo 10,000 L.....	40
5.2 Segundo lote: Prototipo 10,000 L.....	47
5.3 Tercer lote: Prototipo 10,000 L	57
6. Discusión final.....	61
7. Conclusiones	73

8. Bibliografía	76
9. Anexos.....	83
9.1 Anexo A – Formato de registro para la rotación automática	83
9.2 Anexo B – Formato de registro para la aireación forzada	84
9.3 Anexo C – Formato de registro para la generación de lixiviados.....	85
9.4 Anexo D – Formato para el análisis de <i>Confiabilidad</i>	86
9.5 Anexo E – Ayuda visual para la rotación del biorreactor.....	87
9.6 Anexo F – Ayuda visual para el proceso de compostaje	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Primer prototipo de biorreactor de 200 L.....	8
Figura 2. Segundo prototipo de biorreactor de 200 L, con rotación manual	8
Figura 3. Prototipo de biorreactor de 10,000 L.....	9
Figura 4. Prototipo de biorreactor de 300 L donado por la empresa InoxiMéxico	9
Figura 5. Mapa del ITESO	13
Figura 6. Comportamiento de la temperatura y humedad en el proceso de compostaje.....	18
Figura 7. Representación visual de contribución individual.....	25
Figura 8. Formato de registro para ensambles y subensambles.....	26
Figura 9. Formato de registro para componentes.....	26
Figura 10. Cronograma de actividades.....	28
Figura 11. Diagrama de flujo	30
Figura 12. Primeras llantas con rin de Nylamid y área de contacto de poliuretano	38
Figura 13. Desprendimiento de tubos de sensores por la fuerza ejercida por la mezcla	38
Figura 14. Falla en cadenas de transmisión	39
Figura 15. Falla en sensores de humedad y temperatura	39
Figura 16. Carga del biorreactor con residuos orgánicos.....	41
Figura 17. Carga del biorreactor con residuos de jardinería	42
Figura 18. Mezcla de materia orgánica.....	42
Figura 19. Lectura de humedad con valor por encima del 100%	44
Figura 20. Lectura de temperatura de mezcla a través de la pared del tanque.....	45
Figura 21. Lectura de temperatura de mezcla ingresando al biorreactor.....	45
Figura 22. Primer lote de composta generado en el prototipo de 10,000 L.....	47
Figura 23. Trituración de material orgánico	48

Figura 24. Información de los sensores en uso en el HMI.....	49
Figura 25. Sensores estilo banderilla	49
Figura 26. Proliferación de hongos con colación blanquecina en el biorreactor	51
Figura 27. Entradas adicionales para las sondas de muestreo en la cara del tanque	51
Figura 28. Localización de sensores fijos y móviles durante la segunda prueba.....	52
Figura 29. Mezcla después de 5.5 semanas en el biorreactor.....	57
Figura 30. Localización de sensores fijos y móviles durante la tercera prueba	58
Figura 31. SIPOC del proceso de compostaje actual.....	61
Figura 32. Diagrama de flujo de proceso de compostaje.....	63
Figura 33. Comparación de medias al 95% N.C.	65
Figura 34. Diagrama de Ishikawa.....	69
Figura 35. Diagrama de flujo de rotación y aireación forzada	70
Figura 36. Comparación de medias al 95% N.C.	71
Figura 37. Formato de registro FR_001	83
Figura 38. Formato de registro FR_002	84
Figura 39. Formato de registro FR_003	85
Figura 40. Formato de registro FR_004	86
Figura 41. Ayuda visual 1	87
Figura 42. Ayuda visual 2	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Dinámica de la temperatura a lo largo del tiempo	46
Gráfico 2. Dinámica de la temperatura a lo largo del tiempo	55
Gráfico 3. Dinámica de la temperatura a lo largo del tiempo	60
Gráfico 4. Comparación de varianzas al 95% N.C.....	64
Gráfico 5. Gráfico I-M para los datos de la S1	67
Gráfico 6. Prueba de correlación S1 vs T2.....	68
Gráfico 7. Gráfico I-M para los datos de la S1	71
Gráfico 8. Gráfico I-M para los datos de la S2	72
Gráfico 9. Gráfico I-M para los datos de la S3	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Desafíos del proyecto del biorreactor en el ITESO 2019-2022	33
Tabla 2. Datos del primer lote de composta (en kg).....	41
Tabla 3. Datos sobre la rotación del biorreactor y la aplicación de aireación forzada	54
Tabla 4. Datos sobre la rotación del biorreactor	59
Tabla 5. Tratamientos empleados en las pruebas en el prototipo de 10,000 L.....	73

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Relación de humedad de la mezcla	40
--	----

BIORREACTOR PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS BIODEGRADABLES PRODUCIDOS EN EL ITESO

1. Fundamentación

1.1 Introducción

Las actividades diarias de los seres humanos generan desechos que pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos (SEMARNAT, 2005, pág. 344). El impacto de la gestión inadecuada de estos residuos sobre el medio ambiente y la salud de las personas suele ser negativo, y de ahí surge la necesidad de crear conciencia para disminuir o evitar su generación y mejorar su disposición final (SEMARNAT, 2005, pág. 344). Según datos de la Organización de Naciones Unidas (ONU) (2019), se estimó que la población mundial en 2020 alcanzaría los 7,795 millones de habitantes y que para 2030 ascenderá a 8,548 millones (pág. 3); mientras que el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2021) reportó que la población de México fue de 126 millones de habitantes en 2020 (pág. 8). En México, “el 87% de los tiraderos de basura son a cielo abierto y 13% rellenos sanitarios” (SEMARNAT, 2019), y sólo se separa el 15% de los residuos recolectados (SEMARNAT, 2019, pág. 457). Asimismo, existen 173 centros de acopio a lo largo de la República Mexicana, de los cuales 25 están en Jalisco, donde se reciben aquellos materiales que pueden ser reciclados (SEMARNAT, 2020, págs. 48-49). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2020) señala que la generación de residuos per cápita es de 0.944 kg/día (pág. 12); siendo el Estado de México, la Ciudad de México, Jalisco, Veracruz, Guanajuato, Puebla y Nuevo León las entidades federativas que contribuyen a la mitad de los residuos generados a nivel nacional (pág. 19). Jalisco es la tercera entidad federativa más habitada del país con una población de 8,348,151 personas (INEGI, 2021, pág. 8) y genera 7,961 t de

residuos diariamente, lo que representa un 6.6% del total nacional (SEMARNAT, 2020, pág. 19).

Los residuos sólidos se clasifican en tres categorías: susceptibles de aprovechamiento, orgánicos y otros (SEMARNAT, 2020, pág. 23). Los residuos susceptibles de aprovechamientos son aquellos que pueden recuperar su valor económico mediante su reutilización, re-manufactura, rediseño, reciclado y/o recuperación de materiales secundarios o de energía (SEMARNAT, 2003, pág. 14). Los residuos orgánicos son todos aquellos materiales que provienen de especies de flora o fauna, y son susceptibles de descomposición por microorganismos; o bien consiste en restos, sobras o productos de desecho de cualquier organismo (CCA, 2017, pág. 4). La importancia de la separación radica en recuperar aquello que puede ser reutilizado o reciclado, y así disminuir el volumen de materiales depositados en rellenos sanitarios y vertederos (SEMARNAT, 2017). Los residuos orgánicos representan poco más del 51% del peso total de los desechos sólidos que se generan, y es importante separarlos para que no entren en contacto con aquellos que se pueden aprovechar, puesto que ello generaría procesos de percolación que producen lixiviados, algunos altamente contaminantes (SEMARNAT, 2019, pág. 454) (SEMARNAT, 2016, pág. 7). Dicha generación de lixiviados es otro factor que afecta al medio ambiente, ya que pudieran contener elementos nocivos y que, por su estado físico, aumentan las probabilidades de que entren en contacto con el suelo, aguas superficiales y subterráneas, por contacto con arroyos o por procesos de infiltración hasta alcanzar los sistemas acuíferos (Kaza, y otros, 2018, pág. 116) (United States Department of Agriculture, 2010, pág. 74).

A lo largo de la cadena de producción y distribución de productos orgánicos se generan desechos que tienen un impacto social y ambiental (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, 2018, pág. 28). El desperdicio de alimentos en México fue

cuantificado en 20.4 millones de t/año, lo que equivale a más del 35% de su producción (Kaza, y otros, 2018, pág. 167). El impacto social que estos desechos tienen va relacionado con la carencia de acceso a la alimentación. En dicho rubro, el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2018) reportó que, en 2016, el 20.1% de la población mexicana (24.6 millones de personas) sufría de inseguridad alimentaria severa y moderada, y que, en Jalisco, se cuantificaron 1.2 millones de personas con carencia de acceso a la alimentación (pág. 65). En cuanto al impacto ambiental que ocurre por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la descomposición de los alimentos, el Banco Mundial estimó que, en 2020, los desechos sólidos serían la quinta fuente más grande de GEI en el país (Kaza, y otros, 2018, pág. 167). Los principales GEI generados por la degradación de los desechos orgánicos son: dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4), siendo este último el mayor contribuidor, y característico de un proceso anaerobio (United States Department of Agriculture, 2010, pág. 74) (Kaza, y otros, 2018, pág. 118) (Livestock Engineering Unit & Environmental Practices Unit, 2005, pág. 8).

Para reducir el impacto negativo de los desechos orgánicos en el medio ambiente en México, se han promovido distintas iniciativas para fomentar una gestión más adecuada de éstos. Algunos ejemplos son el Proyecto Estratégico de Seguridad Alimentaria, el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), un digestor anaeróbico desarrollado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECITI), y entidades federativas que han impulsado estándares para la separación de residuos orgánicos con el fin de generar compostaje (CCA, 2017, pág. 18), entre otras iniciativas.

La composta es un “producto orgánico complejo con la función primaria de aporte de materia orgánica al suelo, y funciones secundarias de aporte de elementos nutritivos, reducción de la incidencia del parasitismo y ahorro de agua” (Docampo, 2013, pág. 63). Esto último ocurre por el incremento de la capacidad de retención de agua en el suelo donde es aplicada la composta (United States Department of Agriculture, 2010, pág. 1). Existen dos sistemas para la generación de composta: abiertos y cerrados (Docampo, 2013, pág. 66). Entre los sistemas abiertos se encuentran los de pila estática, pila estática aireada y pila con volteo mecánico. Mientras que en los sistemas cerrados están los biorreactores (Docampo, 2013, pág. 67); sistemas controlados cuyo objetivo es obtener composta como producto final, a consecuencia de los procesos biológicos ocurridos en ellos (Soyöz, Ekinci, & Kilic, 2020, pág. 2).

Según datos de la SEMARNAT (2020), parte de los residuos sólidos urbanos recolectados son destinados a una de las 18 plantas de compostaje que existen en el país, distribuidas solamente en 6 de las 32 entidades federativas (pág. 52). Lo anterior complementa a la información plasmada en la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 la cual señala que el número de plantas de compostaje y tratamiento de residuos orgánicos en el país es bajo y hace énfasis en la importancia de hacer una gestión adecuada de estos desechos para “reducir la emisión de GEI, prolongar el tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios, disminuir el gasto público en disposición final [...] y obtener como resultado productos finales como compostas y lombricompostas de buena calidad” (Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018, pág. 1). Por ello por lo que el desarrollo de proyectos para una gestión óptima de residuos orgánicos es fundamental para disminuir su impacto negativo sobre el medio ambiente.

En el 2015, la ONU junto con los líderes mundiales acordaron “poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, y hacer frente al Cambio Climático sin que nadie quede rezagado” (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2019, pág. 2), meta que tiene el 2030 como año de culminación. Para lograr dicho propósito, se plantearon diecisiete objetivos denominados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), y tres están estrechamente relacionados con la investigación y desarrollo de sistemas de gestión de residuos orgánicos: acción por el clima (décimo tercer objetivo), vida submarina (décimo cuarto objetivo) y vida de ecosistemas terrestres (décimo quinto objetivo) (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2019, pág. 6). Con este preámbulo, se dan a conocer los grandes volúmenes de residuos orgánicos que se generan en el país y se revelan las oportunidades de mejora que existen en su gestión. Es de capital importancia la creación de sistemas de gestión de este tipo de residuos, debido al acelerado ritmo de crecimiento de la población y los impactos ambientales negativos que conllevan. De aquí surge una nueva directriz de investigación, que es el desarrollo de un biorreactor con aplicación de gran escala, que cuente con la documentación necesaria para ser replicado por otras instituciones y organizaciones. Esto con la finalidad de contribuir a la preservación del medio ambiente, gracias a los diversos beneficios que el uso de un biorreactor genera, tales como la creación de composta sin la producción de malos olores o la atracción de vectores (e.g. fauna nociva), la disminución de desechos que son depositados en rellenos sanitarios y la reducción de GEI provocados por la descomposición de residuos orgánicos.

1.2 Justificación

El ITESO es una universidad privada que cuenta con una superficie de 51.22 ha y una comunidad conformada por alrededor de 13 mil personas (Arriaga, 2020, pág. 93). Según estimaciones, en el ITESO se generan 40 t de residuos al mes; que son separados en

reciclable, electrónico, orgánico e inorgánico (Lozano & Solano, 2019, pág. 8). De acuerdo con datos recabados en 2019, la generación mensual de residuos orgánicos por parte de cafeterías fue de 3 t durante el periodo de Verano y 4 t en Otoño (Lozano & Solano, 2019, pág. 5). Mientras que la estimación de residuos orgánicos recolectados mensualmente por jardinería ascendió a 8 t (Lozano & Solano, 2019, pág. 5).

El ITESO es una institución caracterizada por su compromiso social y ambiental. Lo anterior se ha visto reflejado en el UI GreenMetric World University Ranking, ya que en el 2019 ocupó el lugar 104, lo que representó un ascenso de sesenta posiciones con respecto al 2016, que fue el primer año en el que participó en dicho ranking (Oficina de Comunicación Institucional, 2020). Actualmente, la gestión de residuos del ITESO depende de cómo éstos son clasificados. Los residuos inorgánicos y orgánicos son recolectados por la empresa privada *RECOLEC*, quien hace una nueva separación de éstos para recuperar los materiales que se pueden reciclar (Lozano & Solano, 2019, pág. 9). El resto es enviado a un relleno sanitario municipal de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) (Lozano & Solano, 2019, pág. 9). Los residuos reciclables son vendidos a otra empresa externa que se encarga de su gestión (Lozano & Solano, 2019, pág. 9). Por último, los residuos orgánicos generados por jardinería y los lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), son empleados para la elaboración de composta por medio de pilas.

La necesidad de desarrollar y construir un biorreactor se detonó por varias razones. La primera de ellas fueron los grandes volúmenes de desechos orgánicos que el ITESO genera, y que el proceso de composta mediante pilas no es adecuado para incluir los residuos orgánicos provenientes de las cafeterías, ya que producirían malos olores, lixiviados y atraerían vectores (i.e. fauna potencialmente nociva). El segundo detonante surgió a partir de una propuesta hecha al ITESO, por parte de una empresa externa, de adquirir un sistema de

compostaje cerrado, que representaba una inversión considerable (Camarena, De Obeso, Zuloaga, & Rizo, 2018, pág. 2).

El proyecto objeto del presente TOG, está dividido en tres líneas de trabajo: Biorreactor, Concientización y Diagnóstico (Lozano & Solano, 2019, pág. 11). La línea correspondiente al biorreactor se refiere a la creación de prototipos y determinación de parámetros para su funcionamiento óptimo (Lozano & Solano, 2019, pág. 11). La línea de concientización tiene como objetivo fomentar un cambio en los hábitos de toda la comunidad universitaria, que propicie la correcta separación de residuos dentro del ITESO (Lozano & Solano, 2019, pág. 11). Por último, la finalidad de la línea de diagnóstico es recabar datos certeros sobre la generación de residuos, determinar tendencias y establecer requerimientos básicos para el tratamiento de éstos (Lozano & Solano, 2019, pág. 11).

Actualmente, existen cuatro prototipos, tres fueron fabricados por personal del ITESO y el cuarto fue donado por la empresa *InoxiMéxico* (Lozano & Solano, 2019, págs. 38-41, 48). Los primeros dos prototipos, elaborados en los talleres de Ingeniería Ambiental, tienen una capacidad de 200 L cada uno, y se construyeron con contenedores de poliuretano -Figura 1 y figura 2- (Lozano & Solano, 2019, págs. 47-48). La diferencia entre ambos radica en su mecanismo de rotación; en el primero es automática y el segundo es de rotación manual (Lozano & Solano, 2019, págs. 39-40). En el tercer prototipo también se empleó un sistema de poliuretano, pero con una capacidad volumétrica mucho mayor, de 10,000 L -Figura 3- (Lozano & Solano, 2019, págs. 47-48). El biorreactor fabricado por *InoxiMéxico* tiene una capacidad de 300 L; está elaborado de acero inoxidable, cuenta con un sistema de aireación forzada, así como un sensor de temperatura -Figura 4- (Lozano & Solano, 2019, pág. 47) (Soto & Gómez, 2020, pág. 11).

Figura 1. Primer prototipo de biorreactor de 200 L



Fuente: (Lozano & Solano, 2019, pág. 39)

Figura 2. Segundo prototipo de biorreactor de 200 L, con rotación manual



Fuente: (Lozano & Solano, 2019, pág. 40)

Figura 3. Prototipo de biorreactor de 10,000 L



Fuente: (Torres, 2021)

Figura 4. Prototipo de biorreactor de 300 L donado por la empresa InoxiMéxico



Las pruebas iniciales realizadas en los dos prototipos de 200 L y en el prototipo de 300 L, ayudaron a determinar los parámetros adecuados para frecuencia y velocidad de rotación, composición ideal de la mezcla, porcentaje de humedad de biomasa, temperatura dentro del biorreactor y uso de composta en la mezcla inicial (Lozano & Solano, 2019, págs. 47-48). Esto con la finalidad de tener un punto de partida para las pruebas en el prototipo de gran escala. El biorreactor de 10,000 L cuenta con un Human-Machine Interface (HMI) y un Controlador Lógico Programable (PLC) y, además, se planea incorporar otros residuos orgánicos, como lodos activados de la PTAR y las toallas de papel para secar las manos en los baños (Lozano & Solano, 2019, pág. 48). El propósito de esta fase es validar el número de rotaciones que este nuevo prototipo de biorreactor requiere, debido al incremento sustancial de sus dimensiones, así como analizar el efecto de la aireación forzada sobre la composta, controlar ciertas variables (i.e. concentración de O_2 y NH_3 , temperatura, humedad) y su impacto en la degradación de la composta, aparte de controlar los parámetros de operación que se definieron con los primeros tres prototipos, así como incluir una nueva variable de control: la relación carbono-nitrógeno (Lozano & Solano, 2019, pág. 48).

La importancia de desarrollar y fabricar un biorreactor que se ajuste a las necesidades del ITESO, radica en que se hará una mejor gestión de sus residuos orgánicos. De esta manera, la universidad estará alineada con sus principios de responsabilidad ambiental, además de reducir los gastos por el uso de los servicios de las empresas recolectoras. Además, se generará el conocimiento necesario para que otras instituciones repliquen los resultados del presente proyecto.

1.3 Objetivos

Objetivo del proyecto general

Contribuir al desarrollo de un programa de gestión integral de los residuos biodegradables en el ITESO, mediante la generación de composta con el uso de un biorreactor, que será aplicada en las áreas verdes de la institución, y así, contribuir a la reducción de residuos enviados a rellenos sanitarios.

Los objetivos particulares son tres:

1. Determinar las condiciones ideales de operación del biorreactor, mediante la realización de pruebas con prototipos
2. Realizar un diagnóstico de la cantidad de residuos biodegradables generados en cafeterías del ITESO y en las actividades de jardinería
3. Participar en el escalamiento del proceso, de prototipos de 200 y 300 L a uno de 10,000 L
4. Elaborar los planos de construcción del biorreactor de 10,000 L y la documentación necesaria para su operación, archivos que serán de dominio público

Para alcanzar los objetivos previamente mencionados, la investigación girará en torno a la siguiente interrogante: ¿Con la combinación correcta de factores como temperatura, humedad, número de rotaciones, pretratamiento, postratamiento y composición de la mezcla inicial; se podrá obtener una composta con la calidad adecuada para que pueda ser aplicada en las áreas verdes del ITESO?

Objetivo de la contribución individual

El objetivo general de la contribución individual es verificar si todos los requerimientos y dimensiones fueron considerados de forma adecuada en la elaboración del primer plan de

recolección y procesamiento de residuos orgánicos, así como en el diseño de la planta de compostaje cerrado del ITESO.

Los objetivos particulares hasta el momento son cuatro:

1. Modelar en 3D el biorreactor de 10,000 L y sus componentes
2. Redactar el manual de construcción del primer prototipo de 10,000 L
3. Realizar un análisis estadístico del proceso a partir del comportamiento de las variables de entrada y la variable de salida elegidas, con objeto de determinar los valores óptimos para la generación de composta que cuente con las características deseadas. Así como determinar si se cuenta con un proceso en control estadístico que cumpla con las especificaciones establecidas para la producción de composta
4. Llevar a cabo un análisis de *Confiabilidad* del producto terminado una vez que éste se encuentre almacenado

1.4 Alcance

El proyecto comenzó en el periodo de Primavera 2019 y actualmente se encuentra en la fase de pruebas con el prototipo de 10,000L. El alcance de esta etapa corresponde a la disposición de residuos orgánicos biodegradables generados en el ITESO. La culminación de esta fase está pactada por la fabricación de al menos un biorreactor adicional de 10,000 L, en el que se pretende incluir todas las mejoras detectadas durante la construcción del primer prototipo. Para esta fase, el biorreactor estará limitado a una capacidad máxima de 10,000 L; operará por lote alimentado, y se incluirán los lodos activados de la PTAR así como las toallas de manos (Lozano & Solano, 2019, pág. 48). Además, se incluirán pruebas con aireación forzada y se monitorearán los niveles de O_2 (Lozano & Solano, 2019, pág. 48). Es importante señalar que los biorreactores aerobios sólo se pueden llenar al 80% de su capacidad, debido a que es necesaria la presencia de aire con O_2 . Este proyecto está bajo la dirección del

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales (PTI), concretamente del Programa de Ingeniería Ambiental.

Con base en los volúmenes de residuos orgánicos que genera el ITESO, se tiene proyectado que serán requeridos tres biorreactores, con una capacidad de 10,000 L cada uno. Se tiene considerado que la planta de compostaje cerrado ocupe un área de 390 m² y se localice atrás de la PTAR, ubicación actual del prototipo de 10,000 L -Figura 5. Se estima que la producción de composta esté en torno a 308 kg/día (Zuloaga, 2020).

El alcance de la contribución individual incluye la elaboración del modelo en 3D del dispositivo de mayor tamaño, la documentación de su manual de construcción y utilización, así como el análisis estadístico del proceso de compostaje. Finalmente, se pretende evaluar la *Confiabilidad* de la composta durante su etapa de almacenaje.

Figura 5. Mapa del ITESO



★ Ubicación del biorreactor de 10,000 L

1.5 Desarrollo conceptual

En las fases previas del proyecto, documentadas Lozano & Solano (2019) y Soto & Gómez (2020), se definieron los valores óptimos para las variables de humedad y temperatura. En esta nueva etapa, se trabajó con dos variables independientes para explicar el comportamiento de la dependiente. Las definiciones de estas variables son las siguientes:

Variable dependiente

- Calidad de la composta (madurez): Composta con una cantidad de materia orgánica estable, libre de patógenos y fitotoxinas que impidan el crecimiento de las plantas (Bernai, Paredes, Sánchez-Monedero, & Cegarra, 1998, pág. 91). La madurez de la composta se define por la relación C:N que presenta (Bernai, Paredes, Sánchez-Monedero, & Cegarra, 1998, pág. 91). Su unidad de medida es el Índice de Maduración de la Composta (*CMI*, por sus siglas en inglés) (Solvita, s.f.). Su relación deberá de estar cercana a 25-30:1.

Variables independientes

- Velocidad de rotación: Es la relación que existe entre el número de vueltas que da un cuerpo alrededor de su propio eje sobre una unidad de tiempo, comúnmente un minuto (Cambridge Dictionary). Su unidad de medidas son las Revoluciones Por Minuto (RPM) (Cambridge Dictionary). Para los prototipos del ITESO se estableció una velocidad de rotación baja, de 1/6 RPM.
- Aireación forzada: Aplicación de una corriente de aire a la mezcla, mediante el uso de ventiladores (Docampo, 2013, pág. 67). Su unidad es de caudal (m^3/h). El ventilador por utilizar es de 1 HP y 220 v de potencia. Esta variable se definirá por el régimen de aireación forzada que se aplicará a la mezcla.

A continuación, se enlistan otro tipo de variables a utilizar:

Exógenas

- Composición de los residuos provenientes de cafeterías: Tipo de alimentos recolectados
- Localización del biorreactor: La planta de compostaje cerrado será detrás de la PTAR

De control

- Temperatura de la composta: Entre 60 y 65°C que se deberá de alcanzar durante los primeros dos días de proceso y se deberá de mantener por al menos 2 días seguidos
- Humedad de la composta: Entre 65 y 70%
- Tamaño de la partícula: 1-3 cm – Se logra con un pretratamiento de trituración
- Material del biorreactor: Poliuretano
- Tamaño del biorreactor: 10,000 L
- Composición de la mezcla: Por cada seis partes de comida, deberá de haber una parte de pasto, cuatro partes de viruta de madera y tres partes de composta (Lozano & Solano, 2019, pág. 5)

Moderadora

- Extracción de gases: Sí o no

Interviniente

- Temperatura ambiente
- Humedad del aire

En esta investigación, el objeto y sujeto de estudio es el biorreactor para la generación de composta.

1.6 Hipótesis

Con base en la información presentada previamente, la hipótesis para esta investigación es:

- Con la combinación correcta de factores como temperatura, humedad, número de rotaciones, pretratamiento, postratamiento y composición de la mezcla inicial; se podrá obtener una composta con la calidad adecuada para que pueda ser aplicada en las áreas verdes del ITESO

Las hipótesis paralelas para la participación individual se definieron como:

- Mediante el modelado en 3D del biorreactor, se podrán establecer los requisitos de espacio y acomodo de estaciones de trabajo para la creación de la planta de compostaje cerrado del ITESO
- A partir del análisis del proceso de compostaje, se determinarán los requisitos de operación del biorreactor, lo que generará un uso eficiente de recursos (e.g. energía y materiales) y disminución de riesgos
- Una vez realizado el análisis de la *vida en anaquel* de la composta, se conocerán las mejores prácticas para su almacenamiento en el ITESO

Las hipótesis mencionadas se catalogan como tentativas, ya que la contribución individual va más orientada al desarrollo y documentación del proyecto del biorreactor.

2. Marco conceptual

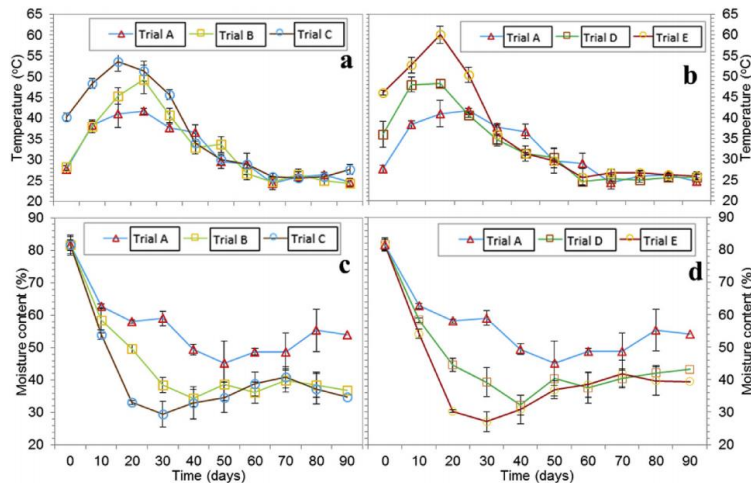
Al elaborar composta, diversos autores se centran en características que son fáciles de observar y medir para determinar su grado de madurez. Según Dickerson (2005), la composta debe de tener un “aspecto de tierra suelta, ligeramente húmeda, [...] de color marrón oscuro o negro, de olor agradable y temperatura similar a la ambiental, donde los constituyentes iniciales no son reconocibles” (García, Lima, Ruíz, & Calderón, 2014, pág. 4). Por otro lado,

el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (2010) menciona que la composta debe de tener un tamaño de partícula menor a 1.27 cm, tener un color marrón oscuro y estar libre de restos de origen inorgánico (pág. 33). Pero ¿qué ocurre al producir composta bajo condiciones controladas? Es aquí cuando entran en cuestión términos como concentración de Oxígeno (O_2), relación Carbono-Nitrógeno (C:N), el tamaño de partícula y la humedad, entre otras variables.

Primero, es importante entender las fases del proceso de compostaje. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) identifica cuatro etapas en este proceso. La primera de ellas es la fase mesófila, en la que comienza la actividad microbiana para degradar fuentes sencillas de C y N, provocando que la temperatura se incremente hasta $45^{\circ}C$ (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 23). La siguiente fase es conocida como fase termófila, y ocurre cuando la temperatura está por encima de $45^{\circ}C$ (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 23). Bajo dichas condiciones, se desarrollan nuevos microorganismos, los termófilos, que inician la degradación de fuentes más complejas de C y transforman N en NH_3 , por lo que los valores de pH aumentan en el medio (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 23). Otra característica por resaltar de esta etapa es que valores altos de temperatura contribuyen a la destrucción de microorganismos patógenos provenientes de materia fecal (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 23). La tercera fase es la de enfriamiento y los valores de temperatura vuelven a oscilar entre 40 y $45^{\circ}C$ (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 24). El pH sigue siendo alcalino (i.e. $pH > 7$) y la degradación de fuentes sencillas de C continúa (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 24). La última etapa es la de maduración, en la que se forman ácidos húmicos y fúlvicos a temperatura ambiente (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 24). Para que el proceso de compostaje

sea adecuado y se obtenga una composta madura y estable, las variables de temperatura y humedad deberán comportarse como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Comportamiento de la temperatura y humedad en el proceso de compostaje



Fuente: (Waqas, y otros, 2018, pág. 74)

Existen diversas variables a medir y controlar durante el proceso de compostaje, actividad que se vuelve más sencilla al tener un sistema cerrado. Sin embargo, esta labor presenta un obstáculo que es la definición de los rangos o valores que deberán adoptar los parámetros a seguir. Liang, Das & McClendon (2003) mencionan que no se tiene una comprensión total de la interacción entre las variables ambientales en el proceso de compostaje (pág. 131). Kalamdhad y Kazmi (2009) señalan que la información sobre mezclas iniciales y parámetros de operación para sistemas de compostaje cerrado es escasa (pág. 130). Numerosos artículos plasman estudios realizados en biorreactores que, por su escala, son clasificados como biorreactores de laboratorio (volumen menor a 100 L) o prototipos (volumen entre 100 y 2,000 L) (Mason, 2007, pág. 22). Estos dispositivos han ayudado a estudiar las dinámicas entre las distintas variables que influyen en el proceso de compostaje, pero trasladar estas prácticas a dispositivos de gran escala (volumen mayor a 2000 L) no siempre es posible, ya

que las condiciones cambian y hacer pruebas en ellos representa un costo más elevado (Phillip, 2010, pág. 32) (Hogan, Miller, & Finstein, 1989, pág. 1082) (Petiot & De Guardia, 2004, pág. 69). Por tal motivo, con la finalidad de respaldar los parámetros que se definieron para realizar las pruebas en el biorreactor de 10,000 L de la planta de compostaje cerrado del ITESO, es necesario analizar los hallazgos de diversos autores a lo largo de los años. Es importante aclarar que este estudio considerará solamente las variables de temperatura, humedad, el tamaño de partícula, concentración de O₂, aireación forzada, régimen de rotación, la relación C:N y la producción de NH₃ porque las pruebas realizadas en los prototipos de 200 y 300 L del ITESO revelaron que son las que tuvieron un efecto sobre la estabilidad y madurez de la composta. Con relación a la emisión de CH₄, se espera que sea mínima al tener un sistema cerrado y es vital monitorearla para garantizar que el proceso no tienda a un estado anaerobio, por lo que se planea incluir esta variable en una fase posterior del proyecto.

El primer rango de operación a definir es la temperatura. En el artículo *Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature* se menciona que la fase termófila tiene mejores resultados si los valores de temperatura oscilan entre 52 y 60°C (Macgregor, Miller, Psarianos, & Finstein, 1981, pág. 1321). Un rango similar se presenta en el artículo *Nitrogen holding property of the composts in an aerobic mesophilic composting reactor for sanitary disposal of human feces*, que está entre 50 y 65°C (Bai & Wang, 2011, pág. 1851). Sin embargo, Kalamdhad y Kazmi (2009) comprobaron que una temperatura de 50°C no es suficiente para que los microorganismos termófilos se desarrollen en el proceso de compostaje (págs. 131-132). Por otro lado, valores altos de temperatura también llegan a ser contraproducentes ya que la gran mayoría de microorganismos deseados no sobreviven a registros mayores de 70°C (Livestock

Engineering Unit & Environmental Practices Unit, 2005, pág. 7) (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983, pág. 163) además de que se corre el riesgo de generar un incendio (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 2). Lozano y Solano (2019) determinaron que el parámetro adecuado de temperatura, alcanzado en los biorreactores de 200 y 300 L del ITESO, se encontraba entre 60 y 65°C (pág. 47).

La humedad es otra variable por controlar. Liang, Das & McClendon (2003) concluyeron que la humedad posee una mayor influencia sobre la actividad microbiana que la temperatura cuando los biosólidos forman parte de la mezcla inicial (pág. 134). Niveles bajos de humedad provocan una deshidratación temprana de la mezcla lo que conlleva una composta con características biológicas inadecuadas (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983, pág. 164). No obstante, altos niveles de humedad provocan una reducción en la permeabilidad y una oxigenación ineficiente (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983, pág. 164). Diversas fuentes sostienen que niveles de humedad entre 40 y 60% son los más recomendables (United States Department of Agriculture, 2010, pág. 21) (Haug, 1993 citado por (Kim, Lee, Won, & Ahn, 2016, pág. 753)). En el caso de que la mezcla contenga biosólidos, el porcentaje de humedad mínimo deberá de ser de 50% y el rango óptimo estará entre 60 y 70% (Liang, Das, & McClendon, 2003, pág. 136). Es importante recalcar que los niveles de humedad adecuados para el proceso de compostaje dependen del tipo de desecho incluido en la mezcla y del tamaño de la partícula (Bernal, Albuquerque, & Moral, 2009, pág. 5445) (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983, pág. 163). Esto último es esencial, ya que una reducción en las dimensiones de los elementos iniciales ayuda a que una mayor área sea expuesta a los microorganismos y, así, éstos puedan iniciar el proceso de degradación en un periodo de tiempo menor (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 1). Lo anterior se debe a que los sustratos requeridos por estos microorganismos son más fáciles de obtener (Román, Martínez, & Pantoja, 2013,

pág. 30). Sin embargo, el tamaño de partícula debe contar con las dimensiones adecuadas para promover el flujo de aire y agua a través de la composta (Kalamdhad & Kazmi, 2009, pág. 130), puesto que partículas muy pequeñas provocarían una compactación de la mezcla (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983, págs. 164-165). Kalamdhad & Kazmi (2009) optaron por partículas de 1 cm para su experimento (pág. 130), Chen, De Haro, Moore & Falen (2011) sugieren partículas de menos de 2.54 cm (pág. 3), y Kumar, Ou & Lin (2010) recomiendan que el tamaño de las partículas esté alrededor de 5 mm (págs. 602-603). Las pruebas realizadas en los biorreactores prototipo del ITESO arrojaron que la humedad ideal debe de estar entre 65 y 70%, mientras que el tamaño de partícula debe de ser entre 1 y 3 cm (Lozano & Solano, 2019, pág. 47) (Soto & Gómez, 2020, pág. 13).

La oxigenación es un factor primordial debido a que los procesos aeróbicos son más eficientes que los anaeróbicos cuando se elabora composta (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 4). En los procesos aeróbicos, los microorganismos absorben O_2 y liberan CO_2 (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 25). La concentración mínima de O_2 que debe de existir en un proceso de compostaje es de 5%, siendo más de 10% el valor óptimo (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 4) (Román, Martínez, & Pantoja, 2013, pág. 26) (Mosher & Anderson, 1977, pág. 29). Es por tal motivo que, en ocasiones, se opta por aireación forzada, que consiste en introducir aire a la mezcla con el uso de sopladores o ventiladores, para mantener los niveles de oxigenación adecuados (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983, pág. 162). Es importante recalcar que esta acción se debe realizar de forma controlada, ya que un exceso de aireación forzada puede provocar un enfriamiento de la mezcla, lo que impediría que se alcance la temperatura necesaria durante la fase termófila (Ahn, Richard, & Choi, 2007, pág. 215). Otra actividad estrechamente relacionada con la oxigenación es la rotación, que tiene la función de generar una mezcla homogénea, evitar que ésta se compacte, mejorar

la circulación de aire y reducir el tiempo de compostaje (Lazcano, Gómez-Brandón, & Domínguez, 2008, pág. 1014) (Jiang-ming, 2017, pág. 320). Es importante determinar un régimen apropiado de rotaciones dependiendo de la composición porque un exceso de giros puede llegar a tener efectos contraproducentes al disminuir los niveles de algunos elementos vitales para el proceso, i.e. temperatura y humedad (Ogunwande, Ogunjimi, & Fafiyebi, 2008, pág. 164) (Jiang-ming, 2017, pág. 320) (Onwosi, y otros, 2017, pág. 142). Para los biorreactores prototipo del ITESO de 200 y 300 L, el número óptimo de rotaciones fue de cinco vueltas a razón de 1/6 RPM, cada 6 horas (Lozano & Solano, 2019, pág. 47).

Por último, cabe mencionar la relación C:N. Dicha variable representa los nutrientes más críticos para que exista una actividad microbiana adecuada y tiene un efecto directo sobre el índice de germinación, el cual determina el grado de madurez de la composta (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 3) (Guo, y otros, 2012, pág. 177). Diversos autores recomiendan una relación C:N entre 25:1 y 35:1 (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 3) (Kumar, Ou, & Lin, 2010, pág. 602) (Bertoldi, Vallini, & Pera, 1983, pág. 134). Esto se ve respaldado con el experimento presentado en el artículo *Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different CN ratios*, al revelar que mezclas con una relación C:N de 12:1 y de 18:1 no lograron mantener los valores de temperatura necesarios para la desactivación de patógenos, por lo que el producto final no logró estabilidad ni la madurez deseada (Gao, Liang, Yu, Li, & Yang, 2010, pág. 618). Los efectos de una relación baja de C:N son el desprendimiento de malos olores por la liberación de NH_3 , y un riesgo latente de generación de lixiviados (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 3) (Livestock Engineering Unit & Environmental Practices Unit, 2005, pág. 8) (United States Department of Agriculture, 2010, pág. 8). Mientras que una relación alta de C:N provocará que los microorganismos no tengan las cantidades de N

necesarias para desarrollarse, ocasionando que no exista un incremento de temperatura y que la velocidad del proceso de degradación sea lenta (Chen, De Haro, Moore, & Falen, 2011, pág. 3) (United States Department of Agriculture, 2010, pág. 8).

La información recolectada de múltiples fuentes, así como un análisis exhaustivo de las condiciones bajo las que se desarrollaron diversos experimentos, fueron la base para definir los valores que adoptarán los distintos parámetros involucrados en el proceso de compostaje cuando se ponga en operación el biorreactor de 10,000 L. Esta investigación ayudará a recolectar y documentar datos sobre las dinámicas de las variables previamente definidas, información que hasta el momento es escasa en biorreactores de gran escala. El biorreactor de 10,000 L contará con sensores de humedad, temperatura, producción de NH_3 y O_2 además de que se tendrá un control de la relación C:N, la aireación forzada, el régimen de rotación y tamaño de partícula. Estos datos ayudarán a realizar un análisis estadístico sobre las dinámicas de las variables presentes en el proceso de compostaje y su relación sobre la calidad de la composta, información que será necesaria para validar los parámetros de operación del biorreactor de la planta de compostaje cerrado del ITESO.

3. Marco metodológico de la investigación

La metodología se divide en dos: investigación general y contribución individual; y consiste en los siguientes puntos:

3.1 Metodología de la investigación general

Herramientas

Las herramientas necesarias antes de la carga de la mezcla en el biorreactor son:

- Tractor, para trasladar la materia orgánica a la planta de compostaje cerrado del ITESO
- Trituradora, para disminuir el tamaño de partícula de los residuos orgánicos

- Vernier, para medir el tamaño de partícula y validar que sea entre 1 y 3 cm
- Pala, para trasladar la mezcla de un punto a otro
- Báscula, para pesar la mezcla

Instrumentación para medir las condiciones internas del biorreactor y la biomasa:

- Sensor de humedad
- Sensor de temperatura
- Sensor de NH₃
- Sensor de O₂
- Termobalanza, para medir el porcentaje de humedad de la mezcla

Instrumentación para controlar las condiciones internas del biorreactor:

- Ventilador

Para el proceso de descarga del biorreactor, es necesario el uso de la pala. Mientras que, para medir la calidad de la composta, se seleccionó el equipo *Solvita's Digital Color Reader (DCR)*.

Formatos de control

Los formatos de control fueron desarrollados específicamente para la investigación -Anexo A al F.

Recolección de información

La toma de datos se realiza de forma automática y de manera continua ya que el biorreactor cuenta con sensores conectados a un PLC y la información es desplegada en el HMI.

Análisis de información

Los datos recolectados por el PLC son almacenados en hojas de cálculo, las cuales se exportan a *Minitab*.

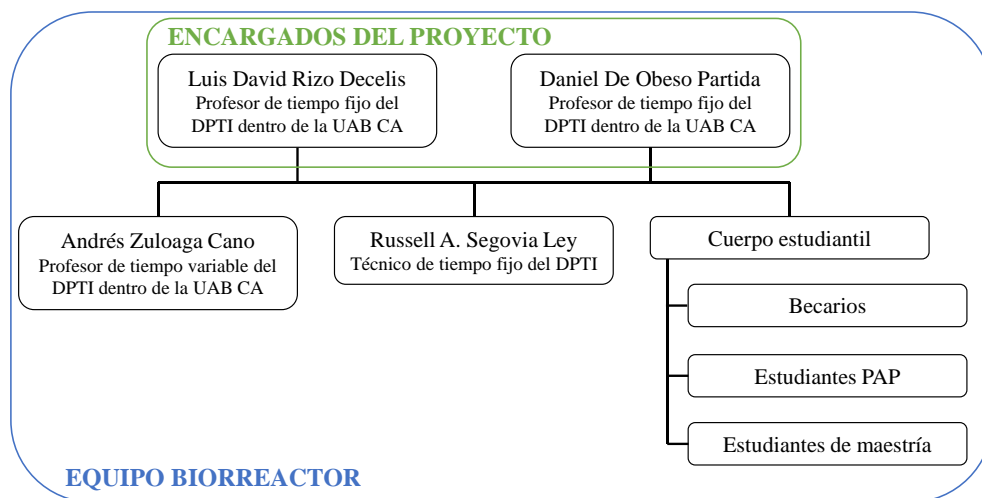
Presentación de resultados

Elaboración de planos de construcción del biorreactor de 10,000 L, sus parámetros de operación y recomendaciones generales. Dichos documentos están orientados a aquellas personas interesadas en replicar el biorreactor.

3.2 Metodología de la contribución individual

La contribución individual está integrada a la investigación general de la siguiente forma:

Figura 7. Representación visual de contribución individual



Herramientas

Se utilizó un flexómetro para medir los componentes del biorreactor de 10,000 L. Además, se contempló hacer uso del dispositivo *DCR* para medir la calidad de la composta una vez que se encuentre almacenada. En cuanto a la utilización de paquetes informáticos, los *softwares* utilizados son *Inventor* para el modelado de sólidos en 3D y *Minitab* para la ejecución de análisis estadísticos. Finalmente, para el desarrollo de los textos, tablas y presentaciones se emplearon las herramientas de *Microsoft Office: Word, Excel, Power Point* y *Teams*.

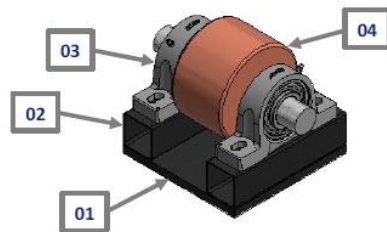
Formatos de control

El formato de control para el registro de las mediciones fue desarrollado específicamente para la investigación y se integró en el manual de elaboración del biorreactor. Para ensambles y subensambles, se utilizó el formato presentado en la Figura 8. Mientras que los detalles de fabricación de componentes sencillos se presentaron en el formato que corresponde a la Figura 9.

Figura 8. Formato de registro para ensambles y subensambles

Nombre del ensamble

Nombre del subensamble

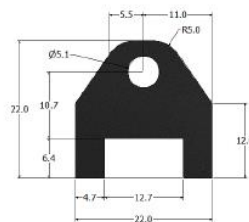


# Parte	Descripción	Cantidad
01	Características técnicas del componente #1	
02	Características técnicas del componente #2	
03	Características técnicas del componente #3	
04	Características técnicas del componente #4	

Figura 9. Formato de registro para componentes

Nombre del ensamble

Nombre del componente



Unidad de medida utilizada para expresar las dimensiones

Para el análisis mediante herramientas de estadística, se utilizó uno de los formatos de control creados para la investigación general, el Anexo A. Por otro lado, para el análisis de *Confiabilidad*, se desarrolló un formato para registrar los valores de CMI, con objeto de determinar la madurez de la composta -Anexo D.

Recolección de información

Se acudió al ITESO a realizar la toma de mediciones y se llenaron los formatos correspondientes. Para el análisis estadístico, la recolección se hizo de forma automática y continua gracias al PLC.

Análisis de información

Se utilizó *Minitab* para el análisis estadístico. Dicho *software* también se seleccionó para el análisis de *Confiabilidad*.

Presentación de resultados

Se redactó un manual de elaboración del primer prototipo de biorreactor de gran escala (10,000 L). Mientras que las conclusiones de los análisis estadísticos están plasmadas en el TOG.

Metas del trabajo de campo y cronograma de actividades

Las metas de trabajo son:

- Modelado en 3D
 - Medición del biorreactor de 10,000 L
 - Modelado de piezas en *Inventor*
 - Creación de ensambles
- Manual de elaboración
 - Selección de fotos y/o capturas
 - Redacción del proceso de fabricación del biorreactor

- Análisis estadístico del proceso de compostaje
 - Determinar el número de muestras a analizar y el periodo de tiempo por el cual se registrarán los datos
 - Recolectar los datos
 - Analizar los datos
 - Presentar los resultados, que estarán respaldados con gráficos

- Análisis de *Confiabilidad* de la composta
 - Establecer el tiempo que se desea almacenar la composta
 - Determinar el número de muestras a analizar y el periodo de tiempo por el cual se registrarán los datos
 - Hacer mediciones semanales de las muestras de CMI
 - Analizar los datos recabados
 - Determinar el periodo de tiempo en el cual la composta conserva sus propiedades iniciales
 - Comparar los resultados obtenidos contra los resultados esperados

En cuanto al desarrollo de actividades y cumplimiento de las metas de trabajo, éstas se llevarán a cabo bajo el siguiente cronograma:

Figura 10. Cronograma de actividades

Actividad	2021										2022				
	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	
Modelado en 3D															
Manual de elaboración															
Análisis estadístico del proceso de compostaje															
Análisis de confiabilidad de la composta															
Presentación de resultados															

4. Estrategia de investigación

Cada contribución individual del presente TOG tiene una estrategia de investigación específica, formulada para obtener resultados que contribuyan a la mejora constante del proceso de compostaje.

4.1 Modelado en 3D y manual de construcción del biorreactor

Justificación

El modelado en 3D es una actividad fundamental para visualizar posibles cambios al diseño antes de que éstos sean realizados físicamente, lo que representa un ahorro de tiempo, esfuerzo y dinero. Esta actividad está estrechamente ligada con el manual de construcción debido a que se puede brindar información detallada sobre ciertos componentes que no son visibles en imágenes. Dicho manual tiene como objetivo documentar el proceso de elaboración del primer biorreactor de 10,000 L del ITESO, que será la base para identificar áreas de mejora para versiones posteriores de este tipo de prototipo.

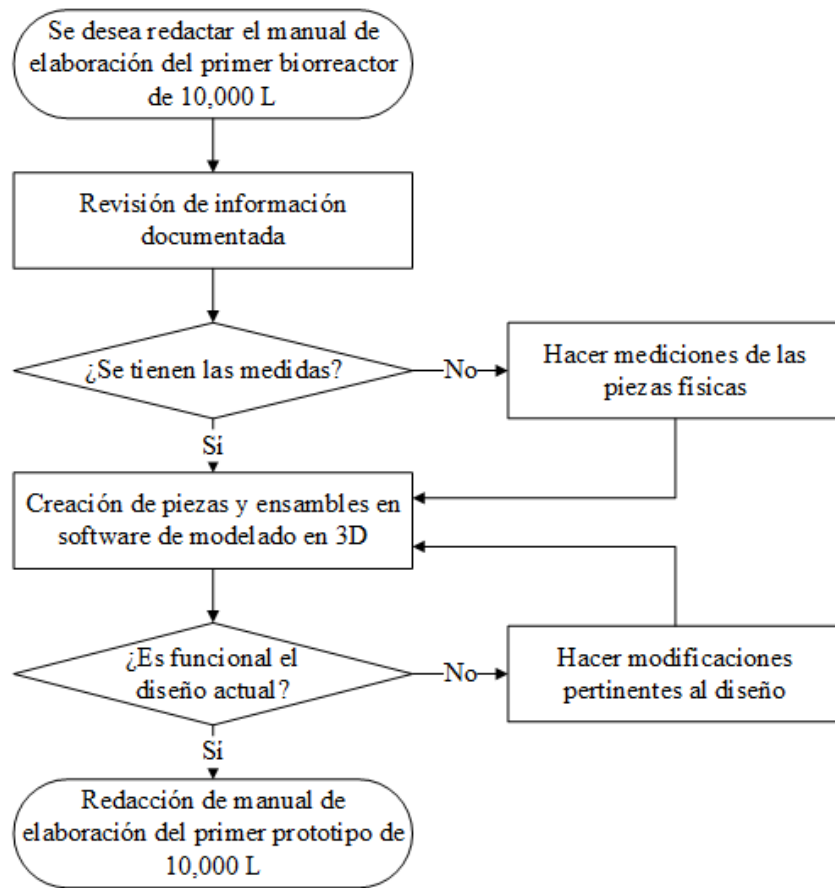
Herramientas e instrumentos

Para esta etapa de la contribución individual, se optó por hacer uso de flexómetro para la toma de medidas del biorreactor y del software *Inventor* para el modelado en 3D. *Inventor* es un software que permite la elaboración de piezas y ensamblajes en 3D, así como planos en 2D.

Etapas del proceso de investigación

El proceso de investigación está marcado por las metas de trabajo del modelado en 3D y la elaboración del manual de construcción, mencionadas en el apartado 3.2 Metodología de la contribución individual. Sin embargo, al ser un proyecto dinámico debido a las constantes áreas de oportunidad que se han detectado durante el transcurso del proyecto, la manera visual de representar las etapas de esta fase es con el siguiente diagrama:

Figura 11. Diagrama de flujo



4.2 Análisis estadístico del proceso

Justificación

El análisis estadístico tiene como objetivo detectar aquellas variables de entrada que tengan un impacto significativo sobre la variable de respuesta. Adicionalmente, se determinará la estabilidad del proceso de compostaje, derivado del comportamiento de los datos con respecto a los límites de control estadístico, así como los de especificación. De esta forma se podrán detectar comportamientos atípicos en el proceso y se podrá trabajar en estrategias para erradicarlos.

Herramientas e instrumentos

El biorreactor cuenta con un PLC, que recolecta información de nueve sensores: seis sensores de temperatura, un sensor de humedad, un sensor de NH₃ y un sensor de O₂. Esta información es almacenada de forma continua por lo que se tomaron muestras siguiendo el principio de aleatoriedad para garantizar que la información no presentara un sesgo durante la ejecución del análisis.

Etapas del proceso de investigación

Las metas de trabajo para análisis estadístico fueron presentadas en la sección sobre análisis estadístico del proceso de compostaje, en el apartado 3.2 Metodología de la contribución individual. Las etapas de este proceso de investigación fueron ejecutadas continuamente con el fin de mejorar el proceso de compostaje.

4.3 Análisis de *Confiabilidad*

Justificación

Es importante definir el tiempo ideal para el almacenamiento de la composta y, por ello, se hará un análisis de *Confiabilidad* de su maduración (CMI) a lo largo del tiempo. Para futuros ejercicios, este análisis se podrá utilizar para comparar la *Confiabilidad* de muestras de composta provenientes del mismo lote, pero almacenadas bajo condiciones ambientales distintas.

Herramientas e instrumentos

Se utilizará el instrumento *DCR* (Solvita, 2021) para determinar el CMI.

Etapas del proceso de investigación

La producción de composta será por lote alimentado, por lo que para esta fase se definirá la cantidad de muestras y la periodicidad en que deberán ser recolectadas. Esto dependerá de la

información recabada, y se definirá el análisis de *Confiabilidad* más adecuado, ya que es posible que no se presenten fallas.

4.4 Desafíos

Los desafíos que ha enfrentado esta investigación han sido diversos y se encuentran documentados en la Tabla 1, y algunos de ellos están ilustrados en las Figuras 12 a 15.

Tabla 1. Desafíos del proyecto del biorreactor en el ITESO 2019-2022

#	Desafío	Área afectada	Departamento responsable	Acción seleccionada	Situación actual	Fecha de inicio	Fecha de finalización
1	Definir diseño de biorreactor	Proyecto Biorreactor	Ingeniería	Cisterna de poliuretano de 10,000 L como punto de partida	Completada	Octubre 2019	Marzo 2020
2	Gestión de infraestructura y servicios para el área del biorreactor	Proyecto Biorreactor	Personal PTI	Seguimiento puntual con servicios generales para la adaptación de un espacio ubicado atrás de la PTAR	Completada	Enero 2020	Marzo 2020
3	Gestión de compra de materiales	Proyecto Biorreactor	Personal PTI	Seguimiento con área de compras	En proceso	Febrero 2020	
4	Gestión para la recolección y separación de residuos orgánicos	Proyecto Biorreactor	Personal PTI	Seguimiento con encargados de cafetería y jardinería	En proceso	Mayo 2019	
5	Gestión para la separación de residuos orgánicos	Proyecto Biorreactor	Personal PTI	Ayuda visual para que usuarios de cafeterías hagan la separación correcta de residuos	En proceso	Previo al inicio de proyecto	
6	Gestión de talleres para manufactura de piezas	Proyecto Biorreactor	Ingeniería	Organización con los encargados de los distintos laboratorios - Se solicita permiso cada vez que se va a hacer uso de laboratorio	En proceso	Marzo 2020	

Continúa en la siguiente página

#	Desafío	Área afectada	Departamento responsable	Acción seleccionada	Situación actual	Fecha de inicio	Fecha de finalización
7	Emisión de facturas por parte de proveedores externos	Proyecto Biorreactor	Proveedor externo	Seguimiento con proveedores externos para solicitar facturas faltantes	Completada	Abril 2020	Agosto 2021
8	Traslado de piezas maquinadas al área del biorreactor al no contar con el apoyo de servicios generales	Proyecto Biorreactor	Personal PTI	Uso de palancas y sogas	Completada	Marzo 2020	Mayo 2020
9	Maniobras de piezas de grandes dimensiones en el área del biorreactor al no contar con el apoyo de servicios generales	Proyecto Biorreactor	Personal PTI	Uso de palancas y sogas	Completada	Marzo 2020	Mayo 2020
10	Sistema de engranaje con cisterna cargada no funciona adecuadamente	Rotación del Biorreactor	Ingeniería	Cambio de transmisión de 6x3 a 6x6	Completada	Marzo 2021	Mayo 2021
11	Llantas conectadas al sistema de tracción se derrapan y por el peso se deformaron	Rotación del Biorreactor	Ingeniería	Cambio de llantas por unas con rin de acero con recubrimiento de poliuretano líquido con dureza de 70° 80°	Completada	Marzo 2021	Mayo 2021
12	La cadena se brinca dientes por exceso de torque	Rotación del Biorreactor	Ingeniería	Creación y colocación de tensores fijos de cadena	Completada	Marzo 2021	Septiembre 2021
13	Deformación de la base móvil (pandeo)	Base móvil	Ingeniería	Colocación de cartabones	Completada	Marzo 2021	Junio 2021

Continúa en la siguiente página

#	Desafío	Área afectada	Departamento responsable	Acción seleccionada	Situación actual	Fecha de inicio	Fecha de finalización
14	No se cuenta con espacio suficiente para colocación de catarina (sistema de transmisión)	Base móvil	Ingeniería	Relocalización de motor	Completada	Marzo 2021	Abril 2021
15	Desprendimiento de tubos de aire y sensores	Instrumentación	Ingeniería	Relocalización de sensores	Completada	Marzo 2021	Febrero 2022
16	Sensores registran datos que no son verosímiles	Instrumentación	Proveedor externo	Calibración de sensores por parte del proveedor	Completada	Octubre 2021	Febrero 2022
17	Proceso de carga de biorreactor	Proceso de pretratamiento	Personal PTI	Se realizará reunión con el equipo para la evaluación de opciones	En proceso	Octubre 2021	
18	Proceso de descarga de biorreactor	Proceso de postratamiento	Personal PTI	Se realizará reunión con el equipo para la evaluación de opciones	En proceso	Octubre 2021	
19	La tapa de la cisterna corre el riesgo de desprenderse por la fuerza que la mezcla ejerce sobre el tubo central	Tambor	Ingeniería	Se añadió un soporte en el tubo central en la parte posterior del biorreactor	Completada	Octubre 2021	Octubre 2021
20	Poca generación de residuos orgánicos en cafeterías del ITESO	Proyecto Biorreactor	Personal PTI	Gestión de recolección de residuos orgánicos con el gobierno de Zapopan	En proceso	Octubre 2021	
21	Sensores miden temperatura del aire, no de la composta	Instrumentación	Proveedor externo	Relocalización de sensores	Completada	Noviembre 2021	Febrero 2022

Continúa en la siguiente página

#	Desafío	Área afectada	Departamento responsable	Acción seleccionada	Situación actual	Fecha de inicio	Fecha de finalización
22	Biorreactor está lixiviando	Tambor	Ingeniería	Se optó por drenar los lixiviados	En proceso	Octubre 2021	Febrero 2022
23	No se está logrando la temperatura deseada	Pruebas	Ingeniería	Se trituraron los residuos de comida	En proceso	Noviembre 2021	Febrero 2022
24	Se descompuso el sensor de humedad	Instrumentación	Proveedor externo	Mantenimiento por parte del proveedor	Completada	Noviembre 2021	Febrero 2022
25	Se rompieron las cadenas de transmisión	Rotación del Biorreactor	Ingeniería	Cambiar por una cadena más grande - de paso 50 a paso 70	Completada	Noviembre 2021	Febrero 2022
26	No hay regulador de frecuencia para soplador de 110V	Instrumentación	Proveedor externo	Se cambió por un soplador de 220V	Completada	Septiembre 2021	Octubre 2021
27	Se detectó que el tamaño y forma del agitador puede llegar a ofrecer resistencia a la mezcla	Tambor	Ingeniería	Corte de medio círculo en agitadores	Completada	Marzo 2021	Mayo 2021
28	Deformación de agitadores con biorreactor en operación	Tambor	Ingeniería	Se evaluarán opciones ya que si se incrementa el calibre del agitador se corre el riesgo de que la cisterna se deforme	En proceso	Noviembre 2021	
29	No hay proveedor en México para equipos de la marca <i>Solvita</i>	Pruebas	Personal PTI	Se contactó a un importador para adquirir un kit para evaluar la madurez	En proceso	Octubre 2021	
30	Se descompuso el sensor de temperatura-humedad	Instrumentación	Proveedor externo	El sensor deberá de ser reemplazado	En proceso	Febrero 2022	

Continúa en la siguiente página

#	Desafío	Área afectada	Departamento responsable	Acción seleccionada	Situación actual	Fecha de inicio	Fecha de finalización
31	El soplador no arroja aire	Instrumentación	Proveedor externo	Reemplazar el tamaño de la aspa y carcasa del soplador	En proceso	Febrero 2022	Marzo 2022
32	Sensores fijos son propensos a dañarse por la resistencia que ofrecen a la mezcla	Instrumentación	Ingeniería	Se evaluará la opción de convertir todos los sensores fijos en móviles	En proceso	Febrero 2022	
33	Sensores de gases registran valores negativos	Instrumentación	Proveedor externo	Mantenimiento por parte del proveedor	En proceso	Febrero 2022	

Figura 12. Primeras llantas con rin de Nylamid y área de contacto de poliuretano



Figura 13. Desprendimiento de tubos de sensores por la fuerza ejercida por la mezcla



Figura 14. Falla en cadenas de transmisión



Figura 15. Falla en sensores de humedad y temperatura



5. Exposición de hallazgos

5.1 Primer lote: Prototipo 10,000 L

La producción del primer lote de composta se conformó por ocho cargas de materia orgánica, realizadas entre el lunes 25 de octubre y el viernes 5 de noviembre de 2021. Cada carga estuvo compuesta por residuos orgánicos procedentes de mercados locales -Figura 16- y por residuos de jardinería del ITESO -Figura17. Es importante señalar que, estos últimos se conforman por ramas trituradas, pasto cortado y hojas. En esta primera alimentación del prototipo de 10,000L, no se trituró el material de entrada antes de ser ingresado al biorreactor -Figura 18. Durante la primera carga se calculó la densidad aparente que dio como resultado 315 kg/m^3 , con una relación aproximada de 3:1. Esta relación se vio modificada en cargas posteriores debido a las características físicas de los residuos provenientes de los mercados locales, calculando la cantidad de residuos de jardinería a utilizar con la Ecuación 1, donde se ha definido en 65% el porcentaje de humedad de la mezcla a ser introducida, dando una relación final de 2:1.

Ecuación 1. Relación de humedad de la mezcla

$$\frac{H_2O}{M_{TOT}} = \frac{(M_{RES1})(H_{RES1}) + (M_{RES2})(H_{RES2}) + \dots + (M_{RESn})(H_{RESn})}{M_{RES1} + M_{RES2} + \dots + M_{RESn}} = 0.65$$

Donde: M – Masa de residuos y H – Humedad de residuos

Las primeras ocho cargas, las cuales dieron un total de 3094.7 kg, estuvieron compuestas de la siguiente forma:

Tabla 2. Datos del primer lote de composta (en kg)

Fecha	Residuos orgánicos	Residuos de jardinería	Masa total de materia orgánica
25/10/2021	180	54	234
26/10/2021	154	51	205
27/10/2021	207	69	276
28/10/2021	153.7	41.4	195.1
29/10/2021	510	170	680
01/11/2021	450	225	675
03/11/2021	232 + 10	239.1	481.1
05/11/2021	167.5	181	348.5
Total	2064.2	1030.5	3094.7

Figura 16. Carga del biorreactor con residuos orgánicos



Figura 17. Carga del biorreactor con residuos de jardinería



Figura 18. Mezcla de materia orgánica

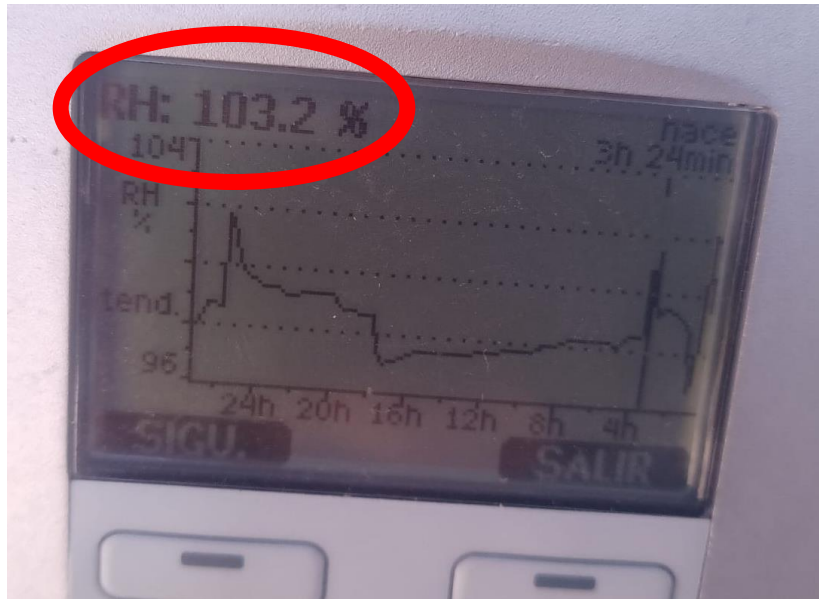


Las ocho cargas detalladas en la Tabla 2 ocuparon aproximadamente un 45% del volumen del biorreactor, valor que fue obtenido por inspección visual. Es importante aclarar que, al ser un proceso por lote alimentado, la descomposición inició desde la primera carga y, que las mezclas, al tener distintas relaciones de materia orgánica, presentaron distintas densidades aparentes que no fueron documentadas. Por ende, la ocupación volumétrica de la composta no pudo ser cuantificada. Además, conforme avanza el proceso de compostaje, la masa se reduce considerablemente, pues se transforma en gases y vapor de agua. Con respecto a la recolección de datos, el PLC se programó para realizar mediciones cinco veces al día, en los siete puntos de muestreo y durante 10 segundos.

La primera carga ayudó a identificar algunos puntos de mejora del biorreactor y del proyecto en general, entre éstos están:

- Fuga de lixiviados
- Datos de las muestras no fueron recolectados en los registros de los sensores de medición continua
- Termómetro con sensor de humedad -Figura 19- y sensor de NH_3 no arrojan lecturas verosímiles
- Sistema de carga del biorreactor necesita ser mejorado ya que actualmente se emplean palas y bolsas de plástico para depositar la mezcla; se está analizando la opción de una banda transportadora con empujadores
- Es necesaria una capacitación adicional por parte del proveedor externo *ISME* para la extracción y lectura de datos
- El sistema de aireación no puede ser programado manualmente

Figura 19. Lectura de humedad con valor por encima del 100%



La velocidad de rotación se puede controlar gracias a la instrumentación con la que cuenta el biorreactor. Los valores están dados en Hz y pueden ir desde 30 hasta 60. Se hicieron pruebas para verificar la velocidad de rotación dependiendo del valor de entrada elegido y se obtuvo que, a 60 Hz, la velocidad de rotación era cercana a 1/6 RPM mientras que a 30 Hz esta velocidad se reducía a 1/12 RPM. Con respecto al sistema de inyección de aire, se hizo una calibración de los valores de frecuencia (Hz) a caudal de aire (ft³/min).

Debido a que el biorreactor no se encontraba a su máxima capacidad, fue necesario medir la temperatura de la mezcla con termómetros de lectura instantánea con vástago ya que los termopares instalados en el prototipo no alcanzaban a hacer contacto con la biomasa, registrando únicamente las temperaturas en el aire dentro del tanque. Estas lecturas manuales se realizaron en dos puntos, a través de una perforación en la pared del tanque -Figura 20- y directamente en la mezcla -Figura 21-, accediendo por la puerta del biorreactor. En promedio se tomaron dos muestras por día, una por la mañana y otra por la tarde. Al comparar la lectura registrada por el termómetro contra la obtenida por los termopares, se observa una diferencia

de aproximadamente 10°C por debajo de la lectura dentro de la mezcla -Gráfico 1. Es importante señalar que, al ser lecturas manuales, éstas no se realizaron de forma sistemática lo que ocasionó una pérdida de información.

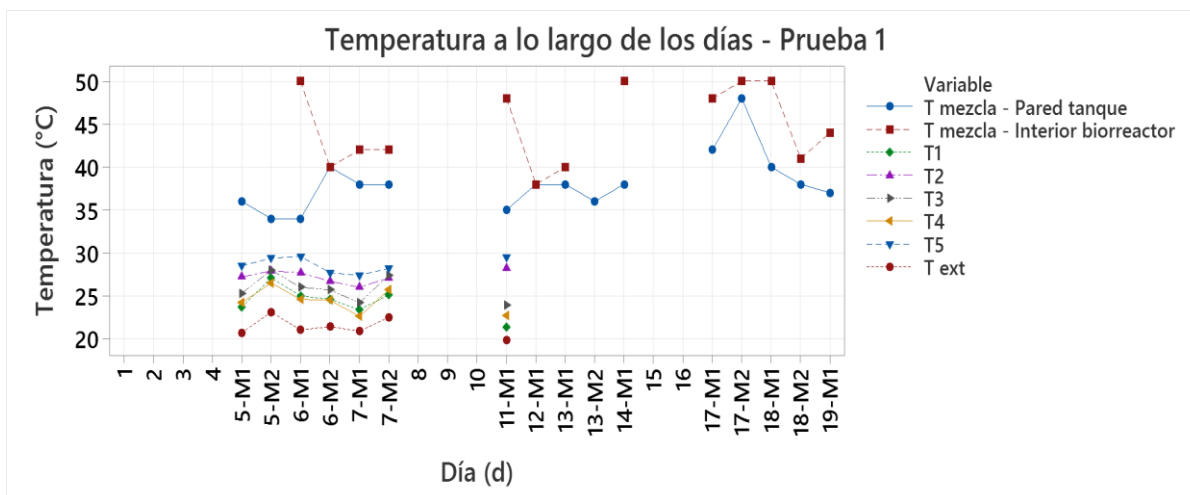
Figura 20. Lectura de temperatura de mezcla a través de la pared del tanque



Figura 21. Lectura de temperatura de mezcla ingresando al biorreactor



Gráfico 1. Dinámica de la temperatura a lo largo del tiempo



La descarga del biorreactor inició el lunes 10 de enero y finalizó el miércoles 12 de enero de 2022. En total se obtuvieron 2175.9 kg, con una densidad aparente de 1165 kg/m³ y consistencia lodosa -Figura 22.

Durante esta prueba no se tenía completamente definida la duración del proceso de compostaje ni el régimen de rotación o la aplicación de aireación forzada. Sin embargo, los resultados del primer lote de composta ayudaron a definir los siguientes pasos de la investigación, en los que se incluyó el análisis estadístico del proceso. Para ello, fue importante entender el funcionamiento de la instrumentación con la que cuenta el biorreactor, para así aprovechar de forma adecuada los datos recopilados por el PLC.

Figura 22. Primer lote de composta generado en el prototipo de 10,000 L



5.2 Segundo lote: Prototipo 10,000 L

La segunda carga del prototipo comenzó el 9 de febrero y concluyó el 11 de febrero de 2022. El origen de la materia orgánica fue de cafeterías y jardines del ITESO, así como de mercados de la ZMG. En esta segunda prueba se realizó una inspección visual del material de entrada para evitar la presencia de elementos no aptos para la composta (e.g. plásticos, metales, etc.), además de que se trituró el material proveniente de los mercados y las cafeterías para evitar la formación de grumos y con objeto de acelerar el proceso -Figura 23. Derivado de la primera prueba, se determinó que la relación entre residuos de alimentos y residuos de jardinería debía de estar en torno a 1:1 para reducir la humedad de la mezcla. No obstante, la relación final fue de 2:1 al haber ingresado al biorreactor 1622 kg de residuos de comida y 801 kg de jardinería, dando un total de 2423 kg. Se obtuvo una densidad aparente de 263 kg/m³ a partir de la información recolectada de tres muestras.

Figura 23. Trituración de material orgánico



La localización de algunos sensores fue modificada para la segunda prueba en el prototipo, por lo que se tenían terminales fijas en el interior y otras móviles para ser insertadas en la pared del tanque. En esta etapa, el biorreactor contó con nueve sensores para medir las condiciones internas, y la información recabada fue almacenada en el PLC y desplegada en tiempo real, gracias al HMI -Figura 24. Es importante señalar que sólo los sensores de temperatura y humedad recolectan información de forma continua, mientras que los sensores de gases lo hacen según las recetas programadas. Los sensores de O_2 y NH_3 comparten los ductos para la captación de gases, que están conectados a siete sondas: cuatro móviles y tres fijas en el interior del biorreactor. Adicional a estas nueve sondas, se tiene un termopar para medir la temperatura ambiente, el cual se ubica debajo de la caja de control. De los sensores de temperatura, tres son estilo banderilla y tres se encuentran fijos. Uno de los sensores fijos de temperatura también registra las lecturas de humedad. En esta segunda carga, se utilizaron todas las terminales fijas: tres de temperatura, una de humedad y tres sondas de gases; además

de una banderilla para temperatura y una para gases -Figura 25. Se programaron cinco recetas para la medición de gases: 00:00, 04:45, 09:30, 14:15, 19:00.

Figura 24. Información de los sensores en uso en el HMI



Figura 25. Sensores estilo banderilla



El lunes 13 de febrero de 2022 se detectó que el movimiento de la mezcla había dañado el sensor de temperatura y humedad. Por lo anterior se evaluará la opción de convertir todos los sensores fijos en móviles para futuras iteraciones del prototipo. Asimismo, el PLC no registró los datos generados durante los primeros 2 días del proceso de compostaje. Personal de *ISME*

evaluó el sistema de sensores y, adicional a los problemas ya señalados, se detectó que el giro del motor del soplador estaba invertido por lo que el flujo de aire no era el adecuado. Se suscitaron otros problemas relacionados al soplador por lo que los tratamientos de aireación forzada empleados durante esta prueba fueron descartados. El sensor de temperatura y humedad no tiene reparación, por lo que será necesario adquirir uno nuevo, y las adaptaciones podrán concluirse una vez que el biorreactor sea descargado.

Con respecto a las condiciones internas del biorreactor, el 16 de febrero de 2022 la mezcla ya presentaba hongos -Figura 26-, lo que indica que el proceso de degradación de los residuos orgánicos se estaba efectuando adecuadamente. Derivado de los resultados de la primera prueba en el biorreactor de 10,000 L, se instaló un dren en el cuerpo del biorreactor para recolectar los lixiviados generados. Entre el 16 y el 26 de febrero de 2022, se extrajeron 230 L de lixiviados aproximadamente, sin embargo, este cálculo pudiera no ser acertado. Lo anterior se debe a que el contenedor en el que se depositaban era vaciado manualmente y no fue posible cuantificar de forma certera la cantidad de lixiviados perdidos por desbordamiento. La densidad de los lixiviados fue calculada en 830 kg/m^3 . Para compensar la falta del sensor fijo de temperatura y humedad, se hicieron dos perforaciones en una de las caras del tanque para insertar dos sondas adicionales, y así, tener más puntos de muestreo -Figura 27. La ubicación de los sensores fijos y móviles está plasmada en la Figura 28. El 21 de febrero de 2022 se giró el biorreactor por primera vez, con un total de 2 vueltas. Las condiciones que detonan la rotación del biorreactor están en fase de definición puesto que se pretende mantener la temperatura por debajo de 65°C , con objeto de preservar los nutrientes de la composta, pero sin comprometer la integridad del tanque, que puede sufrir deformaciones con temperaturas elevadas.

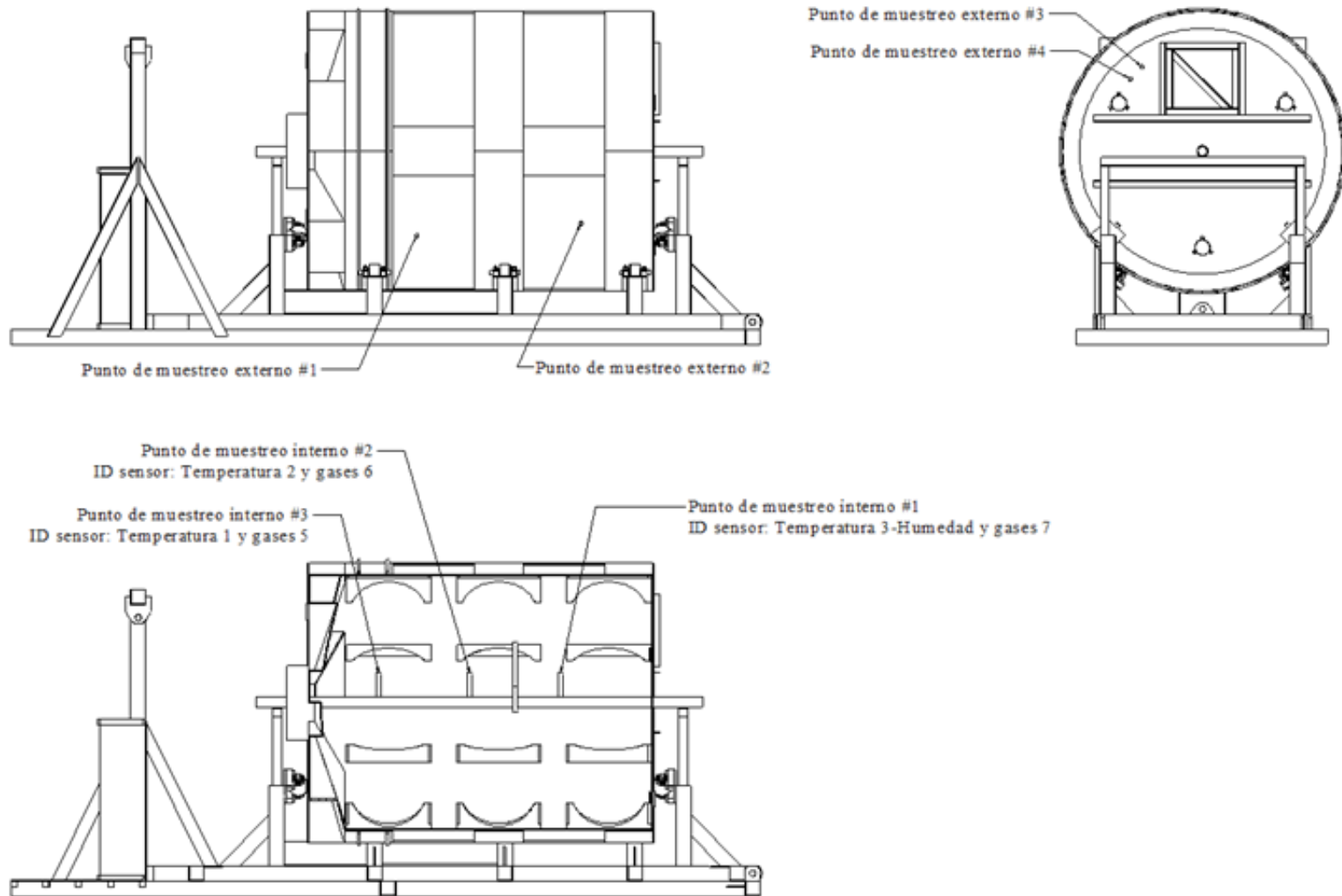
Figura 26. Proliferación de hongos con colación blanquecina en el biorreactor



Figura 27. Entradas adicionales para las sondas de muestreo en la cara del tanque



Figura 28. Localización de sensores fijos y móviles durante la segunda prueba



El 24 de febrero de 2022 se midió de forma manual la temperatura con un termómetro de lectura instantánea con vástago, arrojando valores superiores a 65°C. Lo anterior detonó que se rotara el biorreactor y aplicara aireación forzada de forma más constante. Los registros de estos tratamientos, así como comentarios adicionales del proceso de compostaje, se plasmaron en la Tabla 3. Entre el 28 de febrero y el 1 de marzo de 2022 se añadió agua a la mezcla como resultado de las pruebas de humedad, tanto de puño como con la termobalanza. Las elevadas temperaturas propiciaron que el tanque presentara cierta deformación en una de sus caras, lo que hizo más imperativo el control del proceso de compostaje.

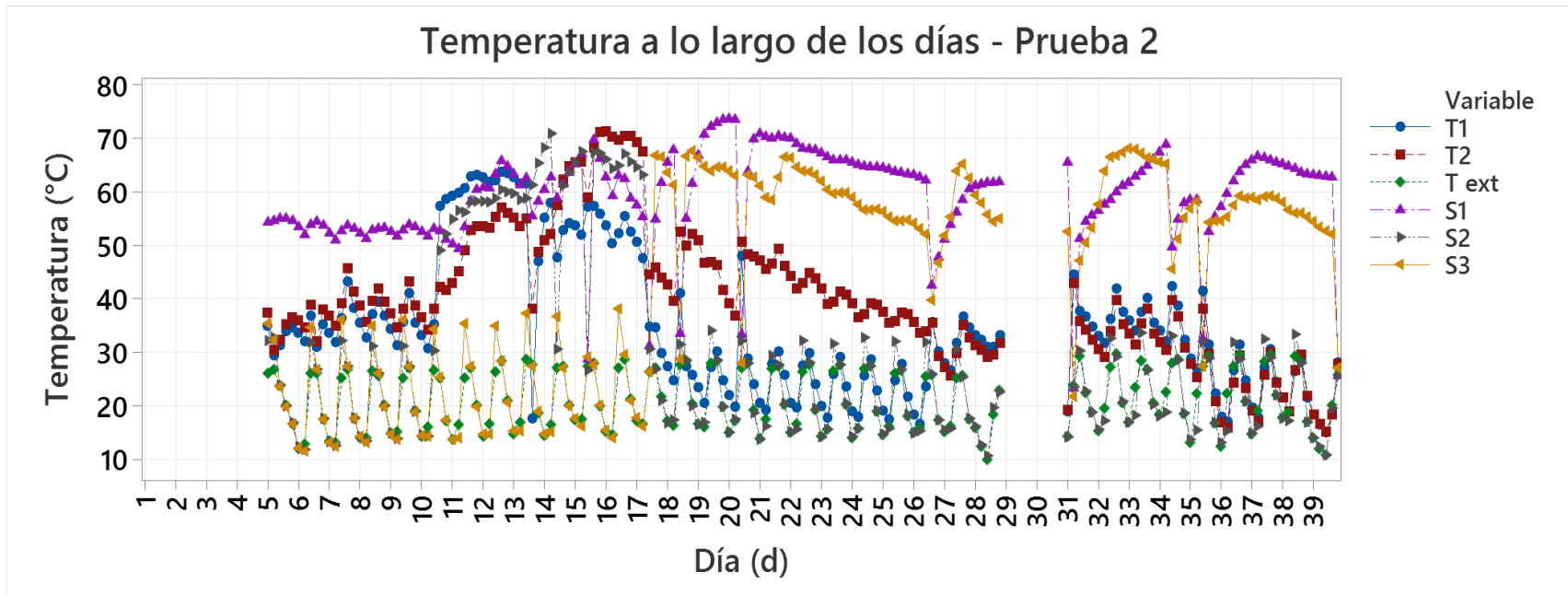
El comportamiento de la temperatura se plasmó en el Gráfico 2, donde se observó que la sonda móvil 1 (S1) siempre fue utilizada para medir las condiciones internas del biorreactor. No obstante, el manejo de las dos sondas externas adicionales no fue adecuado, por lo que, en algunas secciones del gráfico, la sonda móvil 2 (S2) fue la que se introdujo en el tanque mientras que en otras fue la sonda móvil 3 (S3). Adicional a esto, se identificaron caídas pronunciadas en los datos de la S1, S2 y S3. Estos valores corresponden a los lapsos de tiempo en lo que se rotaba el biorreactor por lo que las sondas tenían que ser removidas del tanque. Los sensores fijos, identificados como T1 y T2, miden las condiciones atmosféricas internas ya que el biorreactor no se llena al 100% de su capacidad volumétrica, y al localizarse en el cuadrante superior derecho, sólo entran en contacto con la mezcla cuando se rota el biorreactor. Asimismo, se percibió que los valores registrados tanto por T1 como por T2 presentaron un descenso marcado a partir del día 17 del proceso de compostaje que es cuando la compuerta del tanque se comenzó a dejar abierta para ayudar al enfriamiento de la mezcla. T1, al encontrarse más próximo a los respiradores, llegó a presentar valores similares a la temperatura exterior. Adicionalmente, se detectó que el PLC no registro datos durante el inicio del proceso, así como durante los días 29 y 30.

Tabla 3. Datos sobre la rotación del biorreactor y la aplicación de aireación forzada

# de registro	Día	Temperatura máxima antes de rotación (°C)	Temperatura máxima después de rotación (°C)	Rotación	Comentarios
1	24/02/2022	78.0°C (T.M.) 61.8°C (S)	57.8°C (S)	30 minutos	Aireación forzada por 4 horas
2	25/02/2022	71.2°C (S)	58.5°C (S)	75 minutos	Aireación forzada por 75 minutos Humedad 64.4%
3	26/02/2022	68.4°C (S)	59.3°C (S)	70 minutos	Aireación forzada por 70 minutos
4	28/02/2022	67.1°C (S)	--	18 minutos	Se dejó la compuerta abierta Se agregaron 180 L de agua Humedad 67.6%
5	01/03/2022	1) 68.0°C (S) 2) --	1) 52.4°C (S) 2) --	1) 80 minutos 2) 6 minutos	Se dejó la compuerta abierta Se agregaron 90 L de agua Se rotó el biorreactor en dos ocasiones
6	03/03/2022	73.4°C (S)	51.2°C (S)	125 minutos	
7	18/03/2022	1) -- 2) --	1) -- 2) 54.3°C	1) 6 minutos 2) 12 minutos	Se dejó la compuerta abierta Se rotó el biorreactor en dos ocasiones

T.M.=Valor obtenido con termómetro manual, S= Valor más alto registrado en el HMI al finalizar la rotación del biorreactor

Gráfico 2. Dinámica de la temperatura a lo largo del tiempo



Algunas de las áreas de oportunidad del biorreactor y del proyecto en general que fueron detectadas durante la segunda carga son:

- Sistema para la recirculación de lixiviados
- Eliminación del tubo central y posible relocalización de sensores fijos
- Prescindir de sensor de temperatura y humedad para el prototipo actual de 10,000 L
- Evaluación de sensores de temperatura inalámbricos
- Modificación de agitadores
- Agregar puntos de muestreo externos adicionales
- Elaboración detallada de planes de carga y descarga del biorreactor
- Elaboración de formatos y diagramas que faciliten la operación del biorreactor y el control de proceso
- El sensor de NH_3 volvió a registrar valores negativos por lo que no se tiene certeza si el de O_2 está funcionando correctamente
- El diámetro de las aspas del soplador es menor al diámetro total de la carcasa por lo que el caudal de aire no era adecuado para la magnitud del biorreactor

Se determinó que la descarga del biorreactor se haría una vez que la fase termófila se hubiese mantenido por al menos 4 semanas, por lo que el 22 de marzo de 2022 se descargó a pesar de que la mezcla aún presentaba temperaturas superiores a 60°C . Lo anterior se debe a que la fase termófila favorece a la obtención de una mezcla homogénea que ya no genera malos olores, lo que evita la atracción de vectores. Se obtuvo una masa final de 1132 kg con una densidad aparente de 486 kg/m^3 y tonalidad oscura -Figura 29.

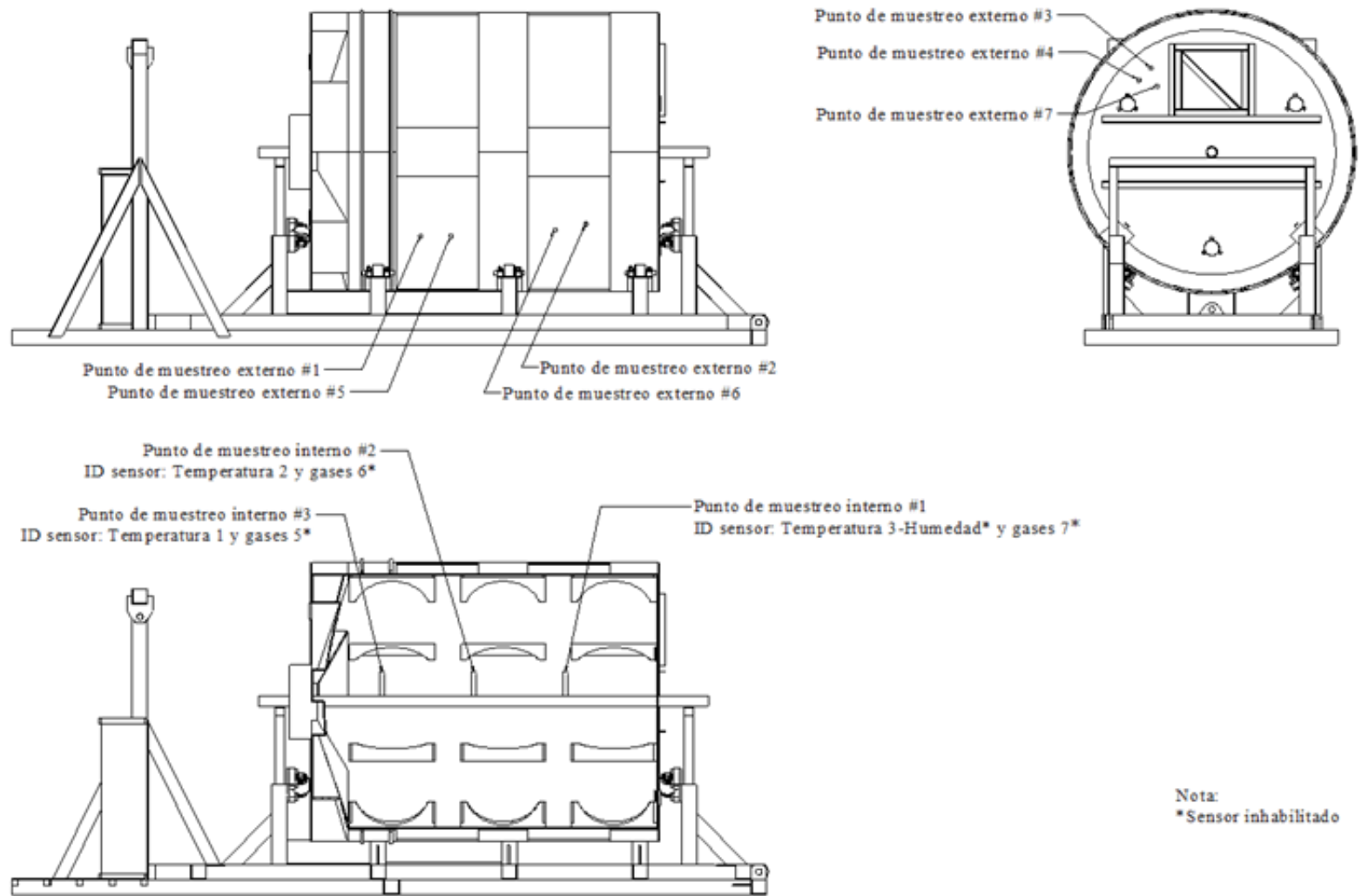
Figura 29. Mezcla después de 5.5 semanas en el biorreactor



5.3 Tercer lote: Prototipo 10,000 L

El 28 de marzo de 2022 se comenzó con la recolección de residuos orgánicos para la tercera prueba, y éstos fueron ingresados en el biorreactor entre el 30 y 31 de abril de 2022. Para esta prueba se optó por mantener una relación 2:1 y no hacer uso del soplador con el objetivo de identificar el efecto que tiene la recirculación de lixiviados en el proceso. La mezcla inicial estuvo conformada por 2,134 kg de residuos de comida y 1,067 kg de jardinería, dando un total de 3,201 kg. Para esta tercera prueba se añadieron dos puntos muestreo externos por lo que la distribución final de los sensores se plasmó en la Figura 30. Es importante mencionar que, adicional a no tener en funcionamiento el sensor de temperatura-humedad, las pruebas realizadas por *ISME* arrojaron un error en los sensores de O_2 y NH_3 por lo que para esta prueba tampoco se contará con datos de dichas variables.

Figura 30. Localización de sensores fijos y móviles durante la tercera prueba



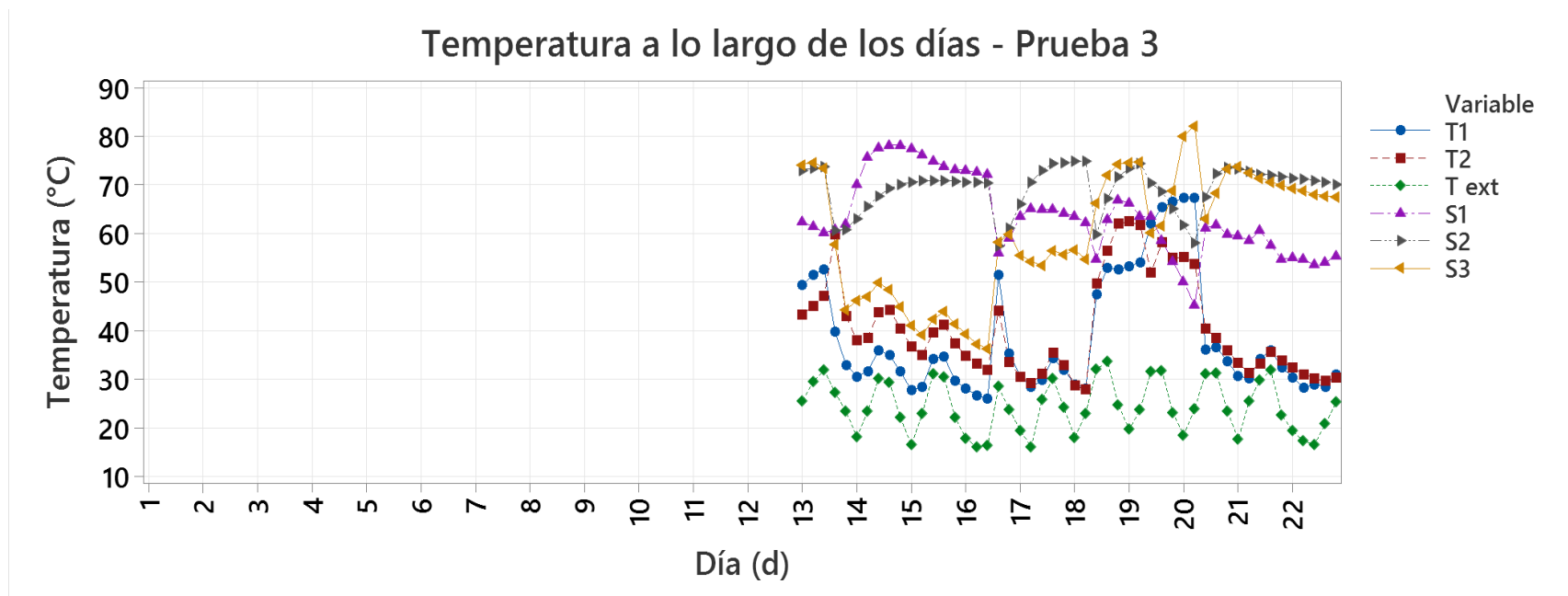
Datos sobre la generación de lixiviados, la frecuencia de rotación del biorreactor, así como otras acciones emprendidas, están recopilados en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos sobre la rotación del biorreactor

# de registro	Día	Temperatura máxima antes de rotación (°C)	Temperatura máxima después de rotación (°C)	Rotación	Comentarios
1	02/04/2022	63.0°C	54.0°C	18 minutos	Se agregaron 90 L de agua Se generaron 2 L de lixiviados
2	06/04/2022	60.9°C	--	18 minutos	Se generaron 13.5 L de lixiviados
3	08/04/2022	69.6°C	58.4°C	60 minutos	Se dejó la compuerta abierta Se generaron 14.5 L de lixiviados
4	12/04/2022	68.5°C	--	60 minutos	
5	13/04/2022	74.0°C	64.4°C	18 minutos	Se agregaron 131 L de agua
6	16/04/2022	70.0°C	--	12 minutos	
7	18/04/2022	74.9°C	53.5°C	18 minutos	
8	19/04/2022	74.8°C	62.3°C	30 minutos	
9	20/04/2022	82.2°C	61.0°C	18 minutos	
10	21/04/2022	--	--	--	Se dejó la compuerta abierta
11	22/04/2022	70.2°C	--	60 minutos	Se dejó la compuerta abierta
12	25/04/2022	71.0°C	54.8°C	18 minutos	Se dejó la compuerta abierta
13	26/04/2022	--	--	24 minutos	Se agregaron 180 L de agua
14	02/05/2022	72.5°C	51.3°C	12 minutos	Se agregaron 180 L de agua

A 3 semanas de haber iniciado la prueba, se graficó el comportamiento de la temperatura -Gráfico 3. Nuevamente se detectaron problemas con la recolección de datos por lo que será necesario contactar a personal de *ISME*. Durante esta prueba se respetaron los puntos de muestreo asignados a cada sonda móvil de temperatura, lo que favoreció al análisis de datos recolectados. Al 13 de mayo de 2022, la prueba 3 sigue en proceso.

Gráfico 3. Dinámica de la temperatura a lo largo del tiempo

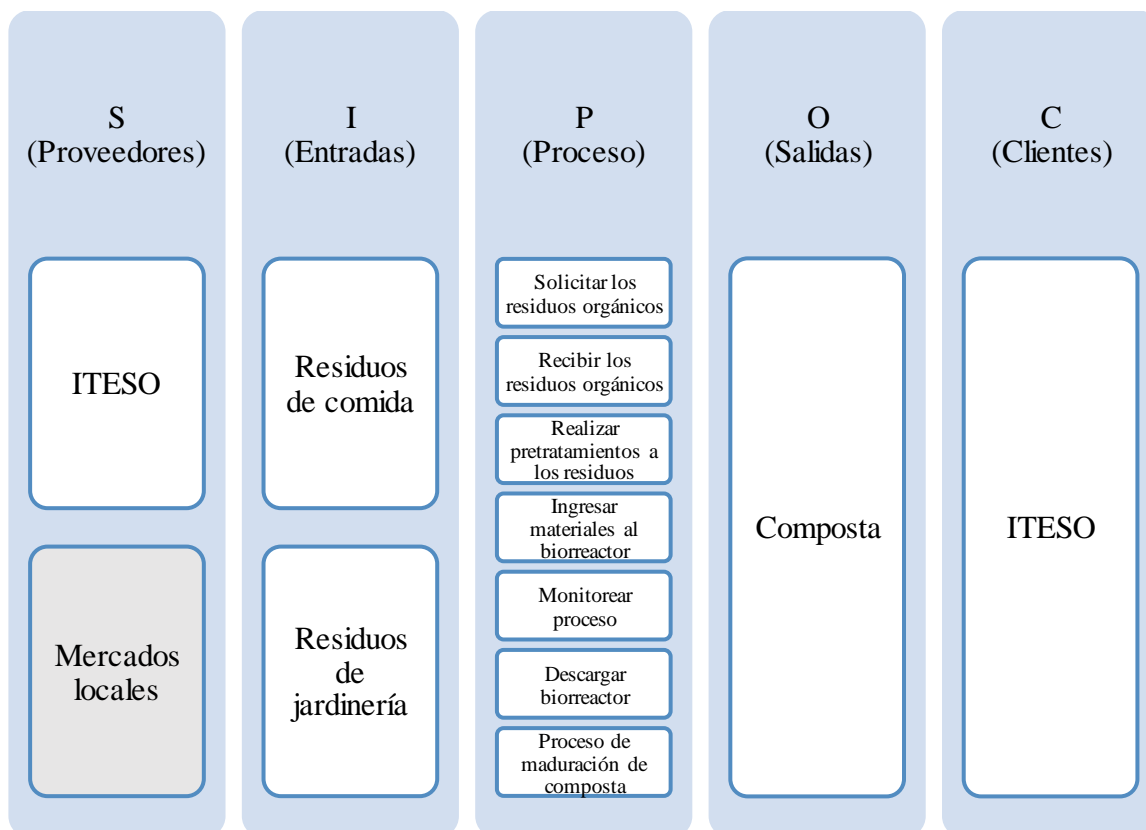


6. Discusión final

Los desafíos enfrentados en las múltiples pruebas realizadas en el prototipo de 10,000 L exhibieron la necesidad de contar con un sistema estructurado para la gestión de la calidad del proceso de compostaje. Por tal motivo, se comenzó con una evaluación de la madurez del sistema de gestión de la calidad (SGC) del proyecto, lo que arrojó un nivel de práctica elemental. Lo anterior denota que, a pesar de que las actividades o procesos son realizados en su totalidad, los datos que existen para su seguimiento y mejora son escasos. Un ejemplo de ello fue la falta de un estándar para la colocación de los sensores móviles ya que éstos cambiaban de ubicación cada vez que se retiraban y se volvían a insertar en el biorreactor.

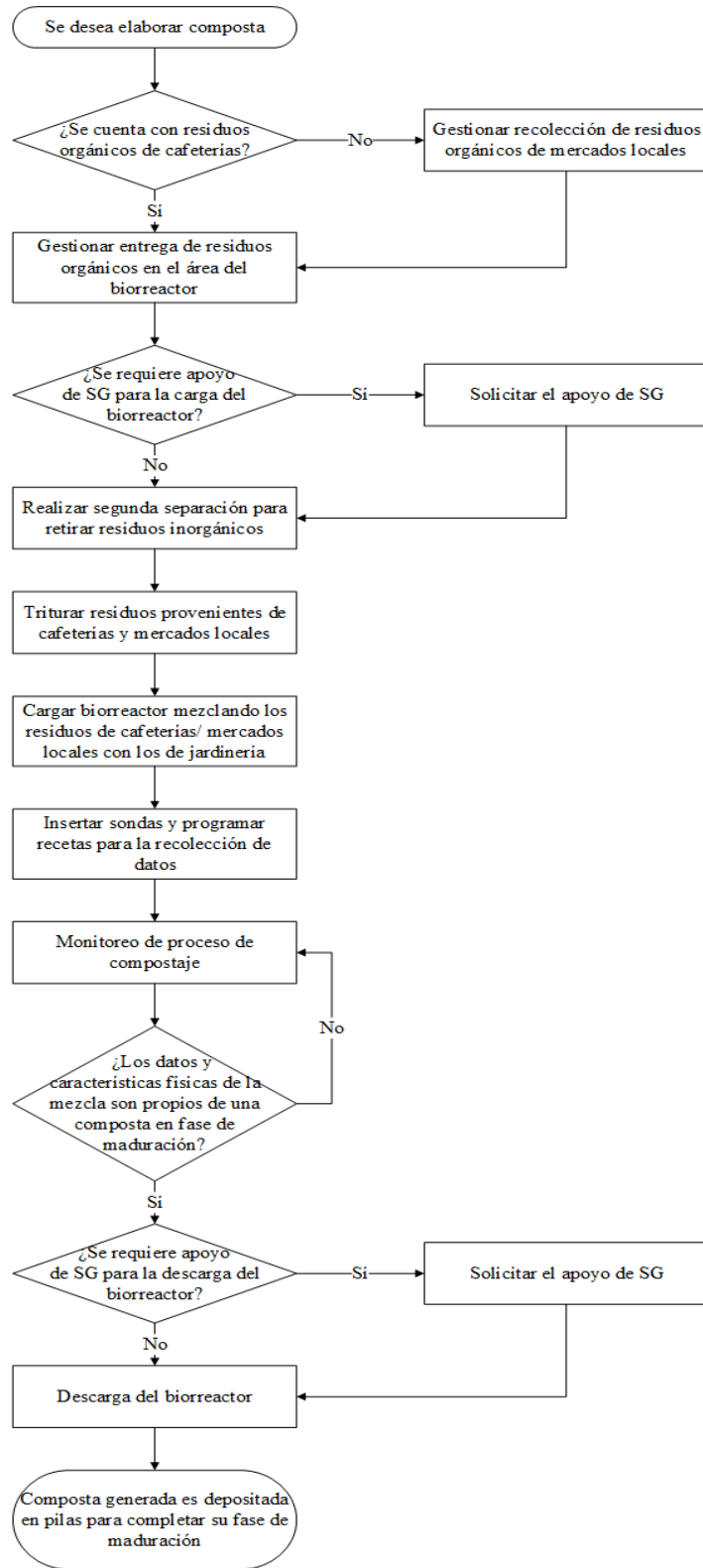
El primer paso fue la elaboración de SIPOC del proceso de compostaje, que se presenta a continuación:

Figura 31. SIPOC del proceso de compostaje actual



El proveedor Mercados locales se encuentra sombreado debido a que se va a prescindir de los residuos orgánicos que generan en Otoño 2022. Además del SIPOC, a lo largo del proyecto se crearon diagramas, planes detallados para optimizar el proceso de carga del biorreactor, formatos de registro y ayudas visuales para robustecer el SGC. Del Anexo A al F se puede encontrar parte de la documentación generada. El diagrama de flujo del proceso de compostaje quedó de la siguiente forma:

Figura 32. Diagrama de flujo de proceso de compostaje



Como se ha mencionado a lo largo del TOG, la temperatura desempeña un papel fundamental en el proceso de compostaje ya que indica la formación de microorganismos necesarios para la degradación de nutrientes. Para este TOG se definió que la fase termófila deberá de alcanzar una temperatura entre 60 y 65°C, no obstante, durante la primera prueba realizada en el biorreactor de 10,000 L la temperatura se encontró por debajo de dichos valores. Por ende, fue importante comparar la temperatura en el interior del tanque de las primeras dos pruebas para verificar si éstas son estadísticamente iguales o no. Gracias a un análisis de comparación de varianzas (σ), se validó que la σ de la prueba 1 y la prueba 2 son estadísticamente iguales -Gráfico 4- por lo que se procedió a hacer una prueba *T de Student* para comparar las medias. Con un 95% de nivel de confianza (N.C.) se demostró que las medias de ambas pruebas son estadísticamente diferentes, lo que denota que las características iniciales de la mezcla, así como las acciones ejecutadas a lo largo del proceso durante la prueba 2, propiciaron que se obtuvieran temperaturas más elevadas -Figura 33.

Gráfico 4. Comparación de varianzas al 95% N.C.

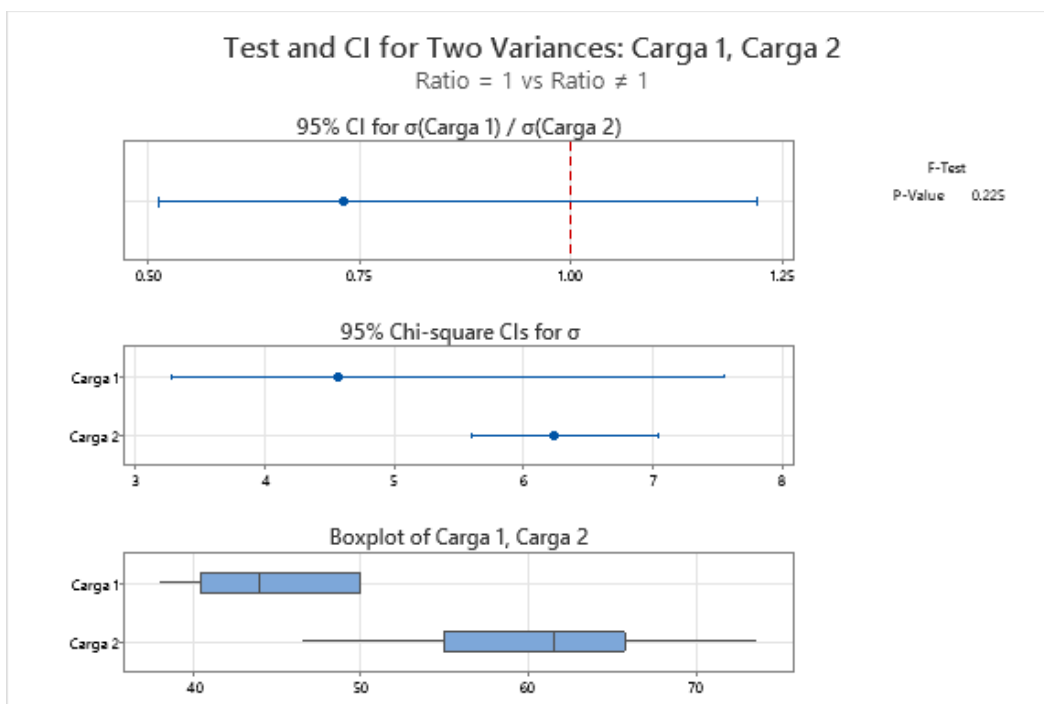


Figura 33. Comparación de medias al 95% N.C.

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
 Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-8.96	161	0.000

Estimation for Difference

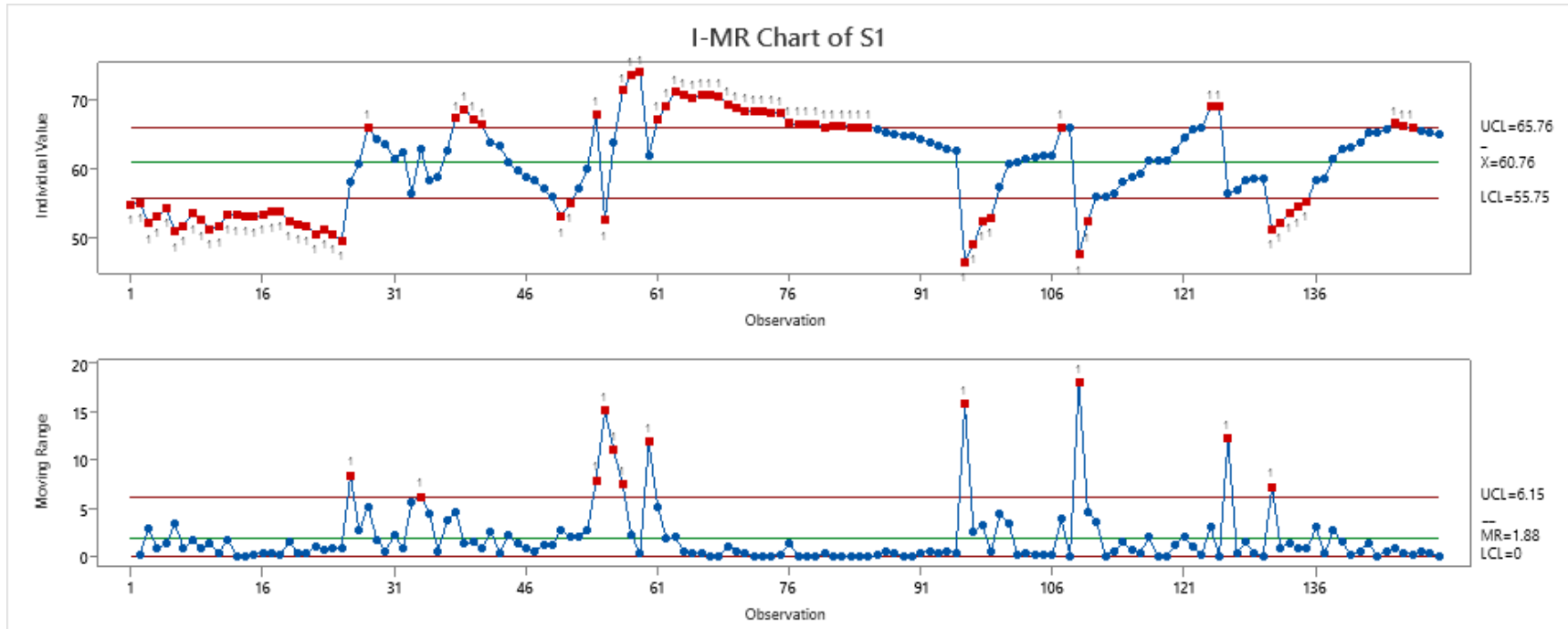
Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
-15.91	6.14	(-19.42, -12.41)

Durante la segunda prueba en el biorreactor de 10,000 L, la temperatura máxima se sobrepasó en múltiples ocasiones, así que se decidió realizar un gráfico de Medias y Rangos móviles (I-M) al contar con una gran cantidad de datos continuos que pertenecían a observaciones individuales. Se seleccionó la S1 al ser el punto de muestreo que se mantuvo dentro de la mezcla durante todo el proceso y el total de datos recabados por este sensor fue de 22,627. El primer paso consistió en remover los valores correspondientes a los lapsos de tiempo en los que la S1 no se encontraba en el tanque. Es importante recalcar que la mayoría de los bloques de datos removidos coinciden con la información plasmada en la Tabla 3, sin embargo, se detectaron rotaciones del biorreactor que no fueron registradas. Culminada esta actividad, restaron 21,990 datos que muestran el comportamiento de la composta a lo largo de las 5.5 semanas que estuvo dentro del biorreactor. Después se determinó que el número de muestras sería de 150, para finalmente seleccionarlas aleatoriamente.

Gracias al gráfico I-M generado -Gráfico 5- podemos observar que el límite superior de control (UCL) se encuentran cercano al límite superior de especificación (USL) para la fase termófila, que es 65°C. Sin embargo, en la sección de observaciones individuales, el

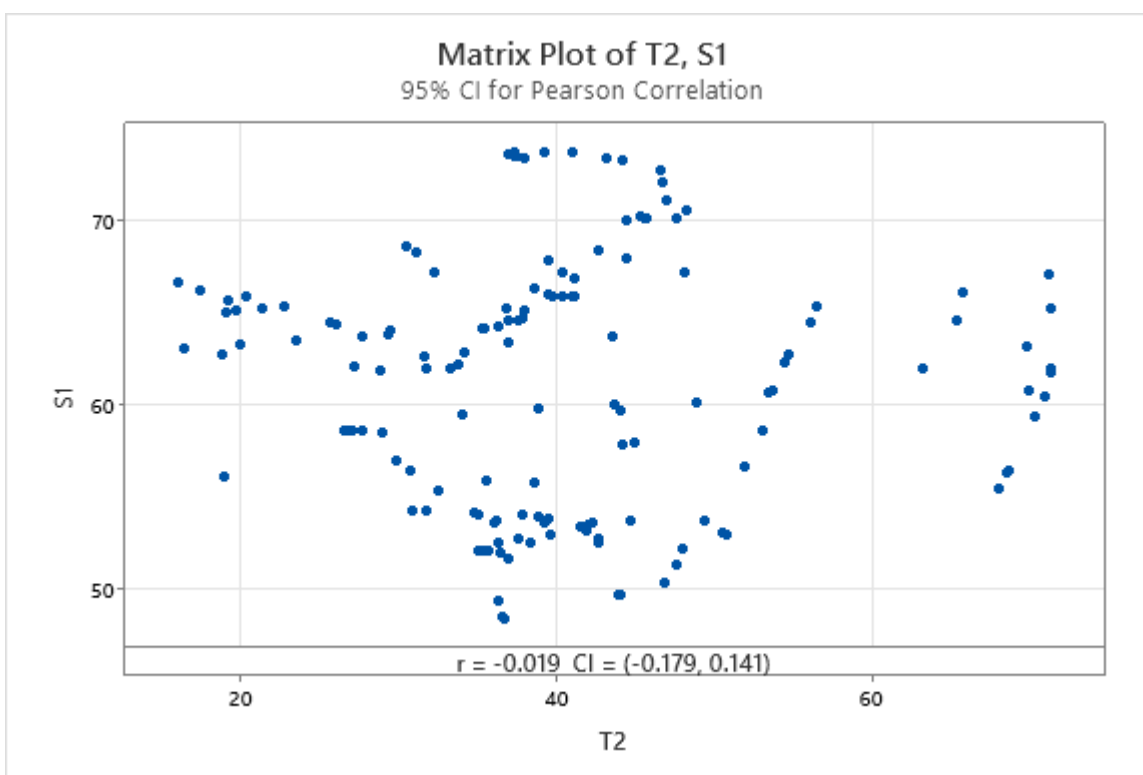
comportamiento de los datos nos comprueba que el proceso no es hábil al tener puntos a más de 3σ con respecto a la línea central en ambos sentidos. Asimismo, el proceso tampoco muestra ser capaz al presentar valores por encima del límite superior de especificación (USL). Analizando la sección de rangos móviles, aquellos puntos que están por encima de 3σ con respecto a la línea central pertenecen a las caídas de temperatura provocadas por la rotación del biorreactor. Se pretende lograr un control estadístico del proceso gracias a las acciones definidas para disminuir la temperatura de la mezcla.

Gráfico 5. Gráfico I-M para los datos de la S1



Por otro lado, se hizo un análisis de correlación entre la temperatura de la composta y la temperatura del aire dentro del biorreactor con el objeto de determinar una relación entre ambas variables y así poder prescindir del uso de los sensores móviles y poder programar la rotación automática. Sin embargo, los datos recolectados durante la segunda prueba mostraron que no existe una correlación entre ambas variables al obtener un coeficiente de correlación de -0.019 utilizando el método de Pearson -Gráfico 6.

Gráfico 6. Prueba de correlación S1 vs T2



Para controlar la temperatura durante la tercera prueba, se evaluó con un diagrama de Ishikawa las posibles causas raíz -Figura 34- y se procedió a elaborar un diagrama de flujo para detonar la rotación del biorreactor, la recirculación de lixiviados y la aplicación de aireación forzada cuando esta última quede instalada de forma adecuada -Figura 35.

Figura 34. Diagrama de Ishikawa

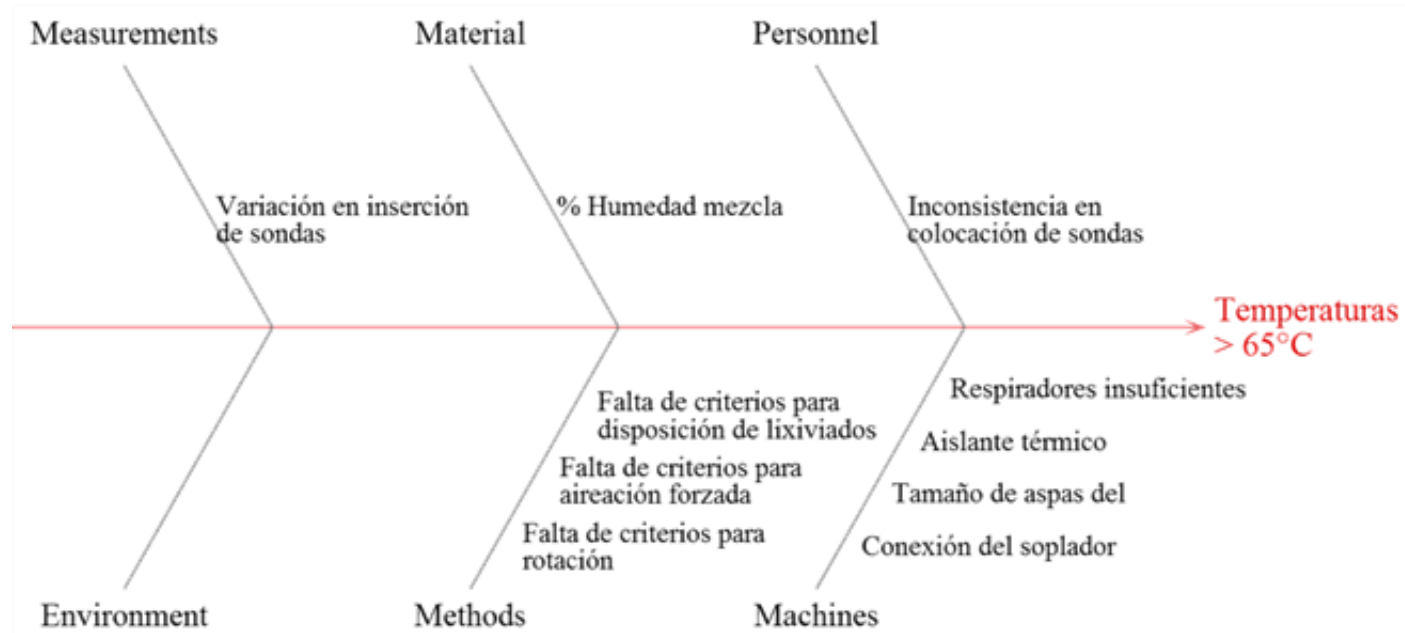
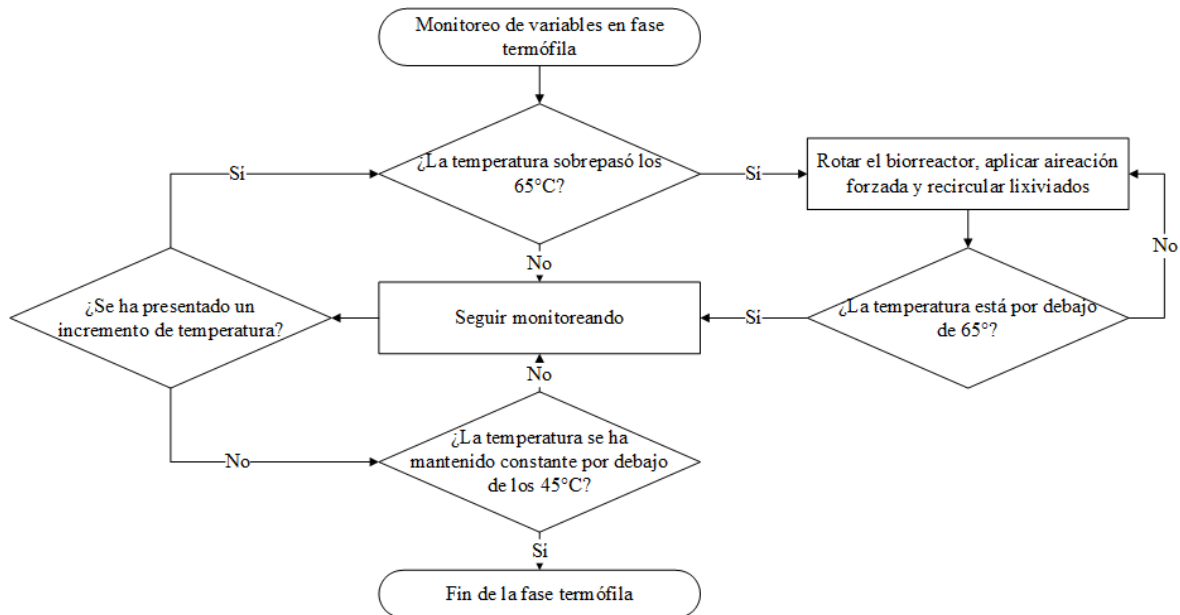


Figura 35. Diagrama de flujo de rotación y aireación forzada



La siguiente fase del análisis estadístico consistió en una comparación de las medias de la prueba 2 y la prueba 3, aunado a un gráfico I-M. El objetivo de estas actividades fue garantizar que las temperaturas óptimas para la fase termófila se siguieran logrando y que las acciones emprendidas para controlar el proceso de compostaje estuvieran generando efectos favorables. Los resultados obtenidos señalan que las temperaturas alcanzadas en la prueba 2 y en la prueba 3 son estadísticamente iguales -Figura 36- lo que nos indica que la recirculación de lixiviado pudiera no tener un impacto significativo en el proceso. No obstante, es necesario seguir controlando y estudiando esta variable en futuras corridas con el propósito de aumentar el tamaño de muestra, y así, poder tener mayor certeza sobre su efecto en el proceso de compostaje. Por otro lado, los gráficos I-M -Gráficos 7 a 9- revelan que el proceso todavía no se encuentra dentro de control estadístico por lo que, una vez concluida la prueba 3, se tendrán que reevaluar los tratamientos seleccionados para lograr este objetivo. Es importante mencionar que los datos de la prueba 3 corresponden a las primeras

3 semanas del proceso de compostaje por lo que será necesario volver a ejecutar los análisis una vez que se descargue el biorreactor.

Figura 36. Comparación de medias al 95% N.C.

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
 Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
-0.06	124	0.953

Estimation for Difference

95% CI for
Difference Difference
 -0.07 (-2.27, 2.14)

Gráfico 7. Gráfico I-M para los datos de la S1

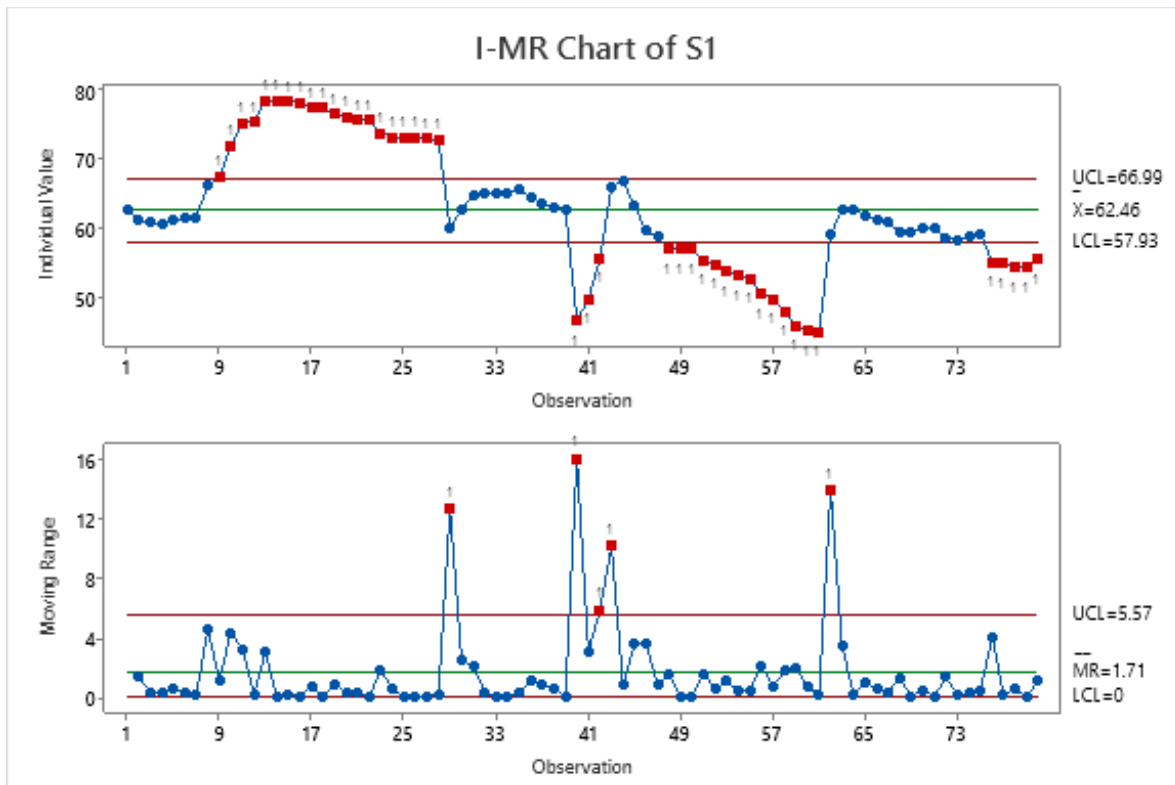


Gráfico 8. Gráfico I-M para los datos de la S2

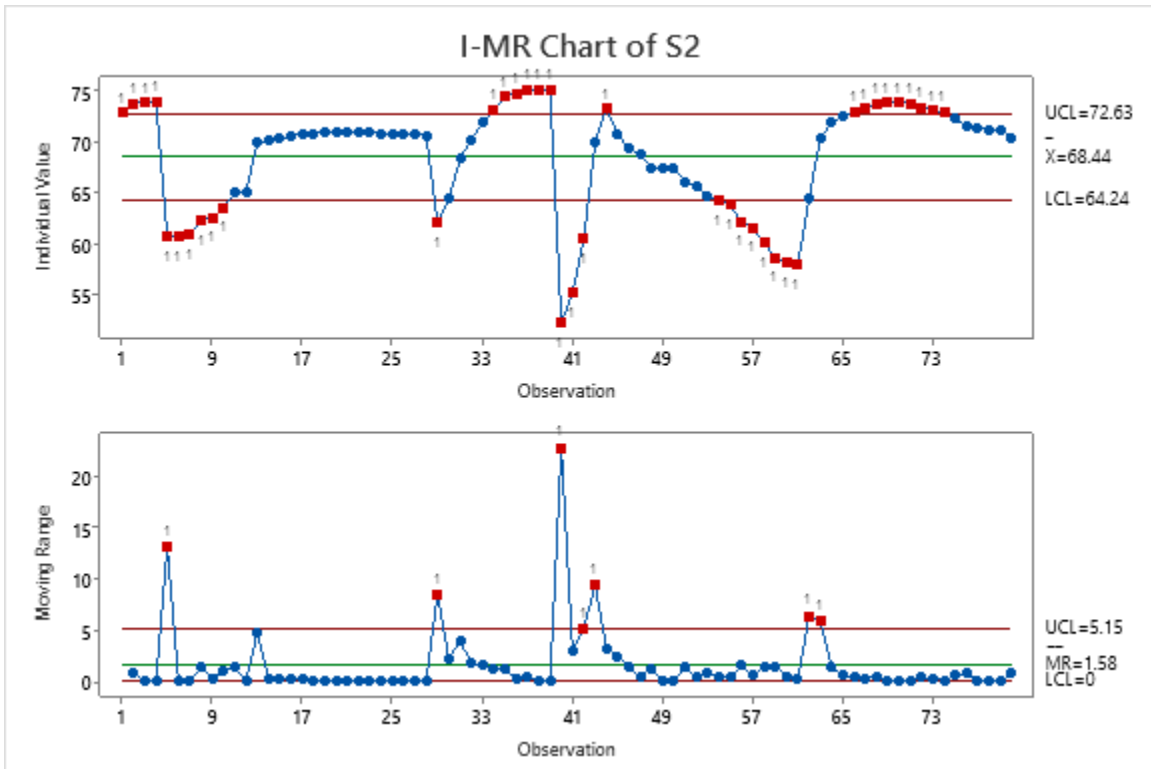
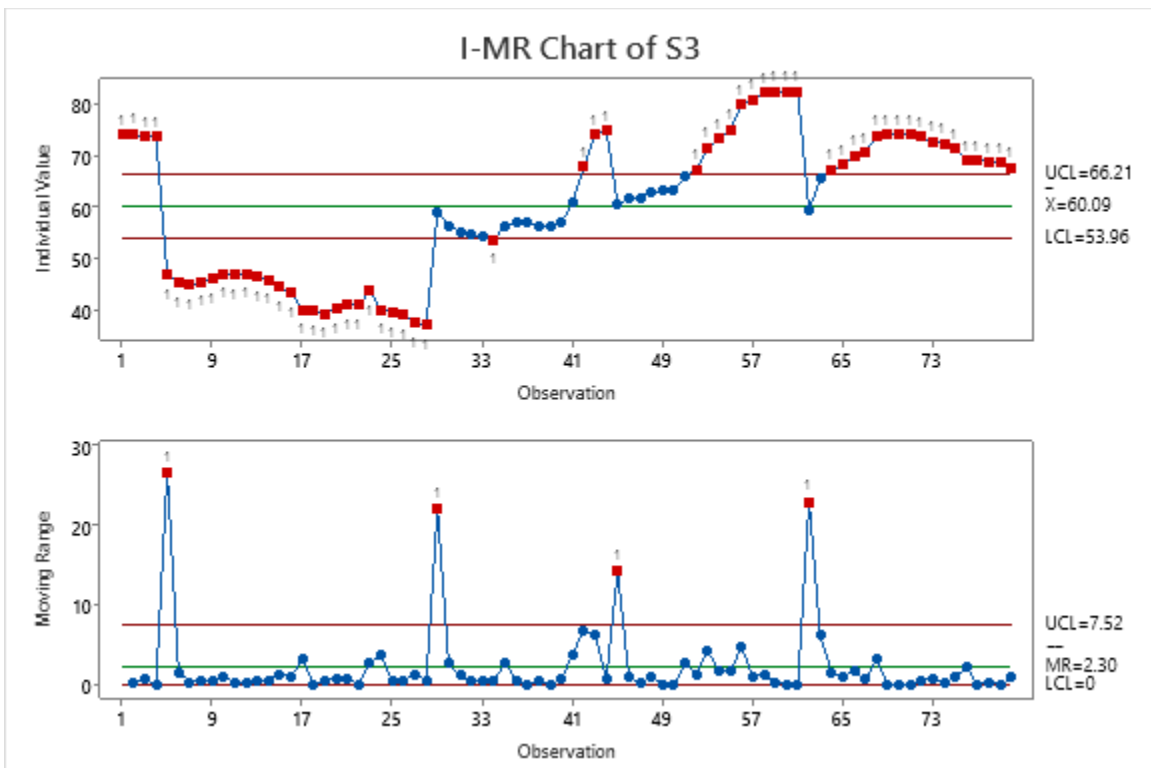


Gráfico 9. Gráfico I-M para los datos de la S3



7. Conclusiones

En la Tabla 5 se sintetizan los tratamientos seleccionados para cada una de las tres pruebas realizadas en el biorreactor de 10,000 L, por lo que los niveles de las variables a utilizar en futuras pruebas en dicho prototipo se deberán de basar en las conclusiones obtenidas en este TOG.

Tabla 5. Tratamientos empleados en las pruebas en el prototipo de 10,000 L

Variable	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Residuos de cafeterías	Sin triturar	Triturados	Triturados
Residuos de jardinería	Sin triturar	Sin triturar	Sin triturar
Relación de residuos	2:1	2:1	2:1
Masa total inicial (kg)	3094.7	2423	3201
Masa total final (kg)	2175.9	1132	Por determinar
Temperatura máxima registrada (°C)	50	73.7	Por determinar
Manejo de lixiviados	Se mantuvieron en el biorreactor	Se drenaron	Se drenaron y recircularon al biorreactor
Rotación	No	Sí (se cuenta con registros parciales)	Sí
Uso del soplador	No	Sí (su funcionamiento no era adecuado)	No
Hidratación de la mezcla	No	Sí	Sí
Duración en el biorreactor (semanas)	9.3	5.4	Por determinar

Las conclusiones generadas son:

1. El modelo en 3D del biorreactor fue fundamental para evaluar alternativas de diseño de ciertos componentes, así como para la creación de ayudas visuales para identificar los puntos de muestreo internos.
2. El manual de construcción del primer prototipo de 10,000 L es parte de la documentación generada para este proyecto, el cual servirá como base para el diseño

y fabricación de futuras iteraciones de biorreactores de esta escala. Además, proporciona detalle de componentes que se encuentran al interior del tanque.

3. Se comprobó la importancia de triturar los residuos provenientes de cafeterías antes de que éstos sean ingresados en el biorreactor, y que su relación con respecto a los residuos de jardinería sea 2:1. Así mismo, se demostró que el proceso, bajo estas condiciones de entrada, es capaz de alcanzar la temperatura deseada para la fase termófila. No obstante, la temperatura se eleva por encima de los 65°C con frecuencia por lo que es imperativo que las acciones desarrolladas para controlarla sean ejecutadas pertinentemente. Para futuras pruebas se evaluará el impacto del soplador sobre la temperatura de la mezcla.
4. El análisis de la composta una vez que ésta se encuentre almacenada no pudo ser llevado a cabo debido a que el importador del kit para evaluar su madurez no cumplió con los tiempos de entrega pactados. A pesar de ello, el enfoque que adquirió la participación individual hacia el monitoreo, control y mejora del proceso de compostaje, ayudarán a garantizar que la composta obtenida cumpla con las especificaciones deseadas. Esto se debe a que la composta generada en el biorreactor de 10,000 L culminará su fase de maduración en pilas con volteo, técnica utilizada actualmente para la producción de la composta utilizada en el ITESO.

Para finalizar, es importante señalar que se deberán de seguir realizando pruebas en el prototipo de 10,000 L mientras éste se encuentre produciendo composta para las áreas verdes del ITESO porque se detectó que las estaciones del año afectan al proceso de carga y descarga del biorreactor. Estos efectos van desde el nivel de fatiga que las operaciones manuales generan en el personal hasta la descomposición acelerada de los residuos orgánicos. Sin lugar a duda las primeras tres pruebas realizadas en el prototipo de gran escala dan pie a una gestión

adecuada de los residuos orgánicos generados por la comunidad ITESO, lo cual ayudará a que esta institución siga sobresaliendo por su compromiso social y ambiental.

8. Bibliografía

- Ahn, H., Richard, T., & Choi, H. (2007). Mass and thermal balance during composting of a poultry manure—Wood shavings mixture at different aeration rates. *Process Biochemistry*, 215-223.
- Arriaga, L. (2020). *Informe del Rector, Julio 2019 - Junio 2020*. Tlaquepaque: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.
- Bai, F., & Wang, X. (2011). Nitrogen holding property of the composts in an aerobic mesophilic composting reactor for sanitary disposal of human feces. *2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection*, 1851-1854.
- Bernai, M., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 91-99.
- Bernal, M., Albuquerque, J., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity. *Bioresource Technology*, 5444–5453.
- Bertoldi, M. d., Vallini, G., & Pera, A. (1983). The biology of composting: a review. *Waste Manage*, 157-176.
- Camarena, C., De Obeso, D., Zuloaga, A., & Rizo, L. (2018, Febrero). *ANTEPROYECTO: COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN EL ITESO*. Retrieved from DEPARTAMENTO DE PROCESOS TECNOLÓGICOS E INDUSTRIALES:
<https://iteso01.sharepoint.com/sites/Biorreactor/Documentos%20compartidos/General/Documentaci%C3%B3n%20previa/Resultados%20de%20anteproyecto%20FEB19.pdf?CT=1604500989045&OR=ItemsView>

- Cambridge Dictionary. (s.f.). *RPM*. Retrieved from Cambridge Dictionary:
<https://dictionary.cambridge.org/es-LA/dictionary/english/rpm>
- CCA. (2017). *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte. informe sintético*. Montreal: Comisión para la Cooperación Ambiental.
- Chen, L., De Haro, M., Moore, A., & Falen, C. (2011). *The Composting Process*. Idaho: University of Idaho.
- Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018, Septiembre 26). *Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 - Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de* . Retrieved from Diario Oficial de la Federación:
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2018). *Estudio Diagnóstico del Derecho a la Alimentación Nutritiva y de Calidad 2018*. Ciudad de México: CONEVAL.
- Docampo, R. (2013, Diciembre). COMPOSTAJE Y COMPOST . *INIA*, pp. 63-67.
- Gao, M., Liang, F., Yu, A., Li, B., & Yang, L. (2010). Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different CN ratios. *Chemosphere*, 614–619.
- García, D., Lima, L., Ruíz, L., & Calderón, P. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*.

- 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*, 171-178.
- Hogan, J. A., Miller, F. C., & Finstein, M. S. (1989). Physical Modeling of the Composting Ecosystem. *Applied and Environmental Microbiology*, 1082-1092.
- INEGI. (2021). *Panorama sociodemográfico de México : Censo de Población y Vivienda 2020*. México: INEGI. Retrieved from INEGI.
- Jiang-ming, Z. (2017). Effect of turning frequency on co-composting pig manure and fungus residue. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 313-321.
- Kalamdhad, A., & Kazmi, A. (2009). Rotary drum composting of different organic waste mixtures. *Waste Management & Research*, 129-137.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., Ionkova, K., Morton, J., . . . Levine, D. (2018). *What a Waste 2.0 - A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington DC: International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Kim, E., Lee, D.-H., Won, S., & Ahn, H. (2016). Evaluation of Optimum Moisture Content for Composting of Beef Manure and Bedding Material Mixtures Using Oxygen Uptake Measurement. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 753-758.
- Kumar, M., Ou, Y.-L., & Lin, J.-G. (2010). Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 602-609.
- Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2008). Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*, 1013-1019.

- Liang, C., Das, K., & McClendon, R. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 131-137.
- Livestock Engineering Unit & Environmental Practices Unit. (2005). *Manure Composting Manual*. Edmonton: Alberta Agriculture, Food and Rural Development.
- Lozano, D., & Solano, A. (2019). *BIORREACTOR PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS PRODUCIDOS EN EL ITESO*. Tlaquepaque: Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental Energética y Alimentaria.
- Macgregor, S. T., Miller, F. C., Psarianos, K. M., & Finstein, M. S. (1981). Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. *Applied and environmental microbiology*, 1321–1330.
- Mason, I. G. (2007). *A STUDY OF POWER, KINETICS, AND MODELLING IN THE COMPOSTING PROCESS*. Canterbury: University of Canterbury and Elsevier.
- Mosher, D., & Anderson, K. (1977). *Composting Sewage Sludge By High Rate Suction Aeration Techniques*. Washington D.C.: Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste.
- Oficina de Comunicación Institucional. (2020, Febrero 14). *El ITESO refrenda su compromiso con el medio ambiente*. Retrieved from ITESO: https://iteso.mx/web/general/detalle?group_id=19998033#:~:text=Entre%20ellas%20se%20encuentran%20la,son%20de%20bajo%20consumo%20energ%C3%A9tico.
- Ogunwande, G., Ogunjimi, L., & Fafiyebi, J. (2008). Effects of turning frequency on composting of chicken litter in turned windrow piles. *International Agrophysics*, 159-165.

- Onwosi, C., Igbokwe, V., Odimba, J., Eke, I., Nwankwoala, M., Iroh, I., & Ezeogu, L. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 140-157.
- Petiot, C., & De Guardia, A. (2004). Composting in a Laboratory Reactor: A Review. *Compost Science & Utilization*, 69-79.
- Phillip, E. A. (2010). *The Design and Construction of a Pilot-Scale Compost Reactor for the Study of Gas Emissions from Compost under Different Physical Conditions*. Montreal: McGill University.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2019). *El Enfoque de la Agenda 2030 en planes y programas públicos*. Ciudad de México: PNUD.
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor, experiencias en América Latina*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. (2018). *Conozco mis desechos y cumplo mis obligaciones*. Guadalajara: D.R.
- SEMARNAT. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos*. México: SEMARNAT.
- SEMARNAT. (2005). *INFORME DE LA SITUACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE EN MÉXICO, Compendio de Estadísticas Ambientales*. México: SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES.
- SEMARNAT. (2016, Enero 19). *Residuos sólidos urbanos: la otra cara de la basura*. Retrieved from Gobierno de México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/39412/RESIDUOS_SOLIDOS_URBANOS-_ENCARTE.pdf

SEMARNAT. (2017, Enero 10). *Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU*. Retrieved from Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/clasificacion-reciclaje-y-valoracion-de-los-rsu>

SEMARNAT. (2019). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018*. México: SEMARNAT.

SEMARNAT. (2019, Enero 18). *Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana*. Retrieved from Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es#:~:text=Sin%20embargo%2C%20en%20M%C3%A9xico%20el, residuos%20tiene%2C%20una%20relevancia%20fundamental>.

SEMARNAT. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. México: SEMARNAT.

Solvita. (s.f.). *CMI Calculator*. Retrieved from Solvita: <https://solvita.com/cmi-calculator/>

Soto, C., & Gómez, A. (2020). *Biorreactor para la gestión integral de residuos biodegradables producidos en el ITESO*. Tlaquepaque: Programa de desarrollo tecnológico para la sustentabilidad ambiental energética y alimentaria.

Soyöz, C., Ekinci, K., & Kilic, Ş. (2020). Effects of Recirculation of Exhaust Air in Rotary Drum Composter on Composting Properties and Energy Consumption. *Waste and Biomass Valorization*.

Torres, E. (2021, Abril 19). *UN FUTURO CON CERO RESIDUOS*. Retrieved from Cruce: <https://cruce.iteso.mx/un-futuro-con-cero-residuos%E2%80%AF/>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). *World Population Prospects 2019, Volume I: Comprehensive Tables (ST/ESA/SER.A/426)*. New York: United Nations.

United States Department of Agriculture. (2010). *Part 637 Environmental Engineering National Engineering Handbook*. Fort Worth: United States Department of Agriculture.

Waqas, M., Nizami, A., Aburiazaiza, A., Barakat, M., Ismail, I., & Rashid, M. (2018). Optimization of food waste compost with the use of biochar. *Journal of Environmental Management*, 70-81.

Zuloaga, A. (2020, Octubre 25). *Diagrama de proceso - Planta de Compostaje Cerrado ITESO*. Retrieved from https://teams.microsoft.com/_#/png/viewer/teams/https:~2F~2Fiteso01.sharepoint.com~2Fsites~2FBiorreactor~2FDocumentos%20compartidos~2FGeneral~2FAvances%20Andr%C3%A9s%20-%20Planta%20de%20compostaje%20ITESO~2FLayout-diagrama-de-proceso-ITESO.png?threadId=19

9.5 Anexo E – Ayuda visual para la rotación del biorreactor

Figura 41. Ayuda visual 1



9.6 Anexo F – Ayuda visual para el proceso de compostaje

Figura 42. Ayuda visual 2

