



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EIB

Escuela de
Ingeniería de Biosistemas

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**ANÁLISIS DEL PROCESO Y CALIDAD DEL COMPOST SINTÉTICO Y ARTESANAL
(TAKAKURA) OBTENIDO DE LA DEGRADACIÓN DE PLA DE 40 μ M UTILIZADO PARA
EL EMPAQUE DE ALIMENTOS**

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de
Biosistemas como requisito para optar por grado de:

Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Javier Stuardo Chinchilla Orrego

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2025

Acta de la Presentación Oral del Trabajo Final de Graduación ante el Tribunal Examinador para Optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Modalidad: Investigación Dirigida
Defensa Pública Mixta

Lugar: Sala de Audiovisuales 2, Facultad de Ingeniería y
Modalidad zoom:
Meeting ID: 828 7902 2324/ Passcode: 407690

Fecha: 08/07/2025

Hora: 04:00 pm

Consecutivo: 10-2025

Artículo 1: Presentación de los miembros del Tribunal del Trabajo Final y del estudiante. Se explica el procedimiento que consiste en la presentación oral de 45 min, el espacio para preguntas, la deliberación del Tribunal y la comunicación del acuerdo, según los artículos 26 y 27 del Reglamento de Trabajos Finales de Graduación.

Nombre del TFG: Análisis del proceso y calidad del compost sintético y artesanal (Takakura) obtenido de la degradación de PLA de 40 µm utilizado para el empaque de alimentos.

NOMBRE DEL POSTULANTE

Javier Chinchilla Orrego

CARNÉ

B41965

FIRMA

Artículo 2: Exposición oral del estudiante

Artículo 3: Sesión de preguntas sobre aspectos propios del trabajo presentado

Artículo 4: Deliberación del Tribunal. Sale de la sala de sesiones el sustentante para la deliberación del Tribunal. Se le avisará al sustentante vía llamada telefónica o el medio acordado con el estudiante.

Observaciones: Hacer las observaciones realizadas por la Ph.D. Nadiarid Jiménez.

Tribunal Examinador

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

ROL

Ph.D. Beatriz Mazón Villegas

Directora TFG

Ph.D. Diego Batista Meneses

Miembro del Comité Asesor

M.Sc. Wendy Porras Barquero

Miembro del Comité Asesor

Ph.D. Nadiarid Jiménez Elizondo

Lectora Invitada

Ph.D. Alejandra Rojas González

Presidenta

Firma:

Voto disidente:

Nota: De conformidad con los artículos 28, 29 y 36, el estudiante deberá entregar las copias con la versión final, incluyendo las modificaciones formuladas en ocasión de la presentación pública, un resumen de 200-500 palabras y la autorización de publicación del trabajo en el repositorio Kérvá. El director del trabajo final de graduación será responsable de que se realicen las correcciones propuestas en la presentación pública y de que la versión final del documento quede debidamente confeccionada.

Calificación del Trabajo Final de Graduación:	Aprobado	X	No aprobado		Aprobado con observaciones	
Aprobación con distinción el Trabajo Final de Graduación:	Sí	X	No			

Artículo 5: La presidenta del Tribunal llama a la candidata y le informa del resultado de la deliberación. En caso de aprobación se le **declara Licenciado en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas** y le advierte la obligación de asistir a un Acto Público de Graduación, para ser juramentado y recibir el diploma correspondiente.

Se levanta la sesión a las:

6:48pm

DEDICATORIA

A mis padres, Héctor y Karla.

A mis hermanos, Héctor y Marie.

A mis abuelas, Doris y Lotis.

A mi abuelo, Armando.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, desde lo más profundo de mi corazón, en primer lugar a mi familia. A mis padres, gracias por impulsarme siempre a seguir adelante con mis sueños, por valorar cada uno de mis esfuerzos y, sobre todo, por jamás dejar de apoyarme. Les agradezco sinceramente por haberme inculcado desde pequeño el amor por el estudio, la curiosidad por aprender y el deseo constante de ser una mejor versión de mí mismo en cada meta que me propongo. Gracias por darme un hogar, alimento, y por colmar mi vida con su amor incondicional. Este trabajo, este título y todo lo que surja a partir de esta investigación son tan solo un reflejo del amor, el esfuerzo y el apoyo que me han brindado desde el primer día. Por siempre, gracias.

A mis hermanos y a mi abuelita Loty, les dedico también este logro. Gracias por su paciencia, compañía y aliento constante durante todo este camino. Aunque el proceso tomó más tiempo del que imaginábamos, nunca dejaron de creer en mí. Este título también es suyo, porque su apoyo fue fundamental para llegar hasta aquí.

Quiero dedicar este trabajo, con todo mi amor, a una de las personas más importantes de mi vida y el gran amor de mi vida: mi abuelita y madre, Mami Doris. Gracias infinitas por haber llenado mi vida del amor más puro y sincero. Gracias por confiar en mí siempre, por tu ternura, por tu fuerza y por haberme acompañado en cada etapa de mi vida. Te llevo en mi corazón cada día y sé que, desde el cielo, me acompañas y celebras cada uno de mis logros. Te amo eternamente.

Agradezco profundamente a mi novia, Marianne, por estar a mi lado en este camino. Gracias por tu apoyo incondicional, por acompañarme en desvelos y madrugadas, por darme ánimos cuando sentía que no podía más, y hasta por prestarme tu computadora cuando más la necesitaba. Pero, sobre todo, gracias por tu amor inmenso, por confiar en mí, por tus palabras de aliento, tus consejos y por no soltarme la mano en ningún momento.

Además, quisiera agradecer desde lo más profundo de mi corazón a mi profesora Beatriz Mazón Villegas, y a mis profesores José Francisco Aguilar Pereira, Guillermo Vargas, Juan Benavides y Geovanni Carmona Villalobos, por ser no sólo excelentes profesionales, sino también amigos de vida. Gracias por sus consejos, tanto académicos como personales, y por creer siempre en mi trabajo y esfuerzo.

También quiero agradecer sinceramente por toda su guía, enseñanza, apoyo y confianza a mi comité asesor del proyecto. Muchas gracias a mi directora de TFG, la Dra. Beatriz Mazón Villegas, y a mis asesores, el Dr. Diego Batista Menezes y la M.Sc. Wendy Porras Barquero. Extiendo mi gratitud a las Dras. Nadiarid Jiménez Elizondo y Gabriela Montes de Oca, quienes creyeron en esta investigación desde el primer día y me acompañaron a lo largo del proceso. Gracias a este maravilloso grupo de investigadores no solo se logró culminar este proyecto con éxito, sino que también se alcanzaron importantes logros, como la participación en un congreso internacional y la obtención del financiamiento mediante la *Beca CeNAT-CONARE*.

Agradezco también al personal de la *Escuela de Ingeniería de Biosistemas* de la Universidad de Costa Rica por su constante acompañamiento y colaboración en todo mi proceso de formación académica y en la elaboración de esta tesis. Asimismo, extiendo mi agradecimiento al personal del *LANOTEC* por su apoyo y compromiso en cada etapa de este proyecto.

Gracias al *CeNAT-CONARE* por otorgar la beca que permitió financiar esta investigación. A Don José, de la empresa *DosMil50*, muchas gracias por la donación de empaques de PLA de 40 µm de espesor, utilizados en la industria alimentaria. A Marianella Abarca, de la *Unidad de Gestión Ambiental (UGA)* de la UCR, gracias por la donación de insumos esenciales para los reactores Takakura. A Don José Carlos Leal, de la empresa *Semillas Selectas*, muchas gracias por la donación de semillas de arroz de la variedad *Lazzarroz*. Y al personal de *La Casita de las Sopas*, gracias por su valiosa colaboración mediante la donación de residuos orgánicos utilizados para la alimentación de los reactores. Muchas gracias al profesor Juan Benavides Valverde, por sus consejos para la implementación del sistema de riego utilizado para la siembra en este trabajo.

Finalmente, quisiera hacer unas menciones especiales para unas personas que también marcaron mi camino. A la familia Lutz Martin, muchas gracias por apoyarme y creer en mí durante estos últimos años. A Andrea Echeverría, gracias de corazón por prestarme una laptop en mi último año de universidad, cuando más lo necesitaba. Y muchas gracias a todas mis compañeras y compañeros de clase, quienes me motivaron a dar siempre lo mejor de mí. En especial, gracias a Edwin Masís, José Pablo Zúñiga, Óscar Durán, Andrés Lastra, Kristal Cordero, Sofía Madrigal y José Villarreal. Ustedes fueron una competencia sana, un equipo valioso y una fuente constante de aprendizaje. Les agradezco por cada proyecto compartido. Los respeto, aprecio y admiro profundamente.

A todos ustedes: seres queridos, docentes, instituciones, empresas, amigas y amigos, gracias por ser parte esencial de este logro. Esta tesis es también suya.

ÍNDICE GENERAL

1.	RESUMEN.....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
3.	OBJETIVOS.....	5
3.1.	Objetivo general.....	5
3.2.	Objetivo específico.....	5
4.	MARCO TEÓRICO.....	6
4.1.	Antecedentes.....	6
4.2.	Fundamentos teóricos y referencias conceptuales.....	7
4.2.1.	Norma UNE-EN 13432.....	7
4.2.2.	Empaques para alimentos.....	7
4.2.3.	Plásticos convencionales.....	8
4.2.4.	Plásticos biodegradables.....	8
4.2.5.	Bioplásticos.....	8
4.2.6.	Plásticos compostables.....	8
4.2.7.	Ácido poliláctico (PLA).....	9
4.3.	Microorganismos en el proceso de compostaje.....	10
4.4.	Tipos de compost.....	11
4.4.1.	Compost sintético.....	12
4.4.2.	Compost artesanal.....	12
4.4.3.	Método Takakura.....	12
4.5.	Parámetros que definen la calidad del compost.....	14
4.6.	Métodos para caracterizar la desintegración de un material de empaque.....	15
4.6.1.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).....	15
4.6.2.	Análisis termogravimétricos (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC).....	16
4.6.3.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	17
4.6.4.	Análisis Dinámico Mecánico (DMA).....	18
5.	METODOLOGÍA.....	20
5.1.	Descripción general.....	20
5.2.	Cuantificación del grado de desintegración y el proceso de compostaje, en condiciones controladas, en inóculo comercial y Takakura.....	22
5.2.1.	Preparación del material de empaque.....	22
5.2.2.	Preparación de los reactores de compostaje.....	24
5.2.3.	Preparación del compost sintético.....	26
5.2.4.	Preparación del compost Takakura.....	34
5.2.5.	Control del proceso de compostaje.....	37
5.2.6.	Determinación de la masa seca y de los sólidos volátiles del compost sintético.....	39
5.2.7.	Medición del grado de desintegración del PLA.....	40
5.2.8.	Cuantificación del grado de desintegración del PLA.....	40
5.2.9.	Disminución del contenido en sólidos volátiles.....	41
5.2.10.	Caracterización del PLA durante el proceso de compostaje.....	41
5.2.10.1.	Calorimetría de barrido diferencial (DSC).....	41
5.2.10.2.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).....	42
5.2.10.3.	Análisis termogravimétrico (TGA).....	42

5.2.10.4.	Análisis Mecánico Dinámico (DMA).....	42
5.2.10.5.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	42
5.3.	Evaluación de la influencia de la degradación de PLA en la composición de dos tipos de compost (comercial y Takakura) mediante un análisis de abonos orgánicos en condiciones de laboratorio.....	43
5.4.	Ensayos de fitotoxicidad.....	43
5.5.	Análisis estadístico.....	44
6.	RESULTADOS.....	50
6.1.	Grado de desintegración y el proceso de compostaje del polímero biodegradable PLA.....	50
6.1.1.	Preparación del inóculo sintético.....	50
6.1.2.	Preparación del inóculo artesanal.....	52
6.1.3.	Control del proceso de compostaje.....	53
6.1.3.1.	Control de olor y aspecto visual a lo largo del proceso de compostaje.....	53
6.1.3.2.	Control de poblaciones microbianas a lo largo del proceso de compostaje.....	57
6.1.3.3.	Control del contenido de humedad, temperatura y el pH a lo largo del proceso de compostaje.....	59
6.1.3.3.1.	Control del contenido de humedad a lo largo del proceso de compostaje.....	59
6.1.3.3.2.	Control de la temperatura a lo largo del proceso de compostaje.....	61
6.1.3.3.3.	Control del pH a lo largo del proceso de compostaje.....	64
6.1.4.	Medición del grado de desintegración.....	66
6.1.5.	Resultados del contenido de sólidos volátiles.....	67
6.1.6.	Caracterización del polímero durante el proceso de compostaje.....	68
6.1.6.1.	Calorimetría de barrido diferencial (DSC).....	68
6.1.6.2.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).....	78
6.1.6.3.	Análisis termogravimétrico (TGA).....	88
6.1.6.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	90
6.1.6.5.	Análisis Mecánico Dinámico (DMTA).....	94
6.2.	Análisis de abonos orgánicos.....	95
6.2.1.	Evaluación de los análisis de abonos orgánicos.....	95
6.2.2.	Análisis estadístico de abonos orgánicos.....	99
6.3.	Ensayos de fitotoxicidad.....	105
7.	CONCLUSIONES.....	126
8.	RECOMENDACIONES.....	129
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
10.	APÉNDICES.....	137
11.	ANEXOS.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Degradación hidrolítica del PLA.	9
Figura 2. Equipo de FT-IR Thermo Scientific® - Nicolet iS50FT - IR del LANOTEC.	15
Figura 3. Equipo de TGA (TA Instruments® - TGA) 500 del LANOTEC.	16
Figura 4. Equipo de DSC (TA Instruments® - DSCQ200) del LANOTEC.	17
Figura 5. Equipo de SEM (JEOL - JSM 6390LV) del LANOTEC.....	18
Figura 6. Equipo de DMA (TA Instruments® - Discovery HR-3) del LANOTEC.....	19
Figura 7. Metodología de investigación.....	21
Figura 8. Material de ensayo, empaque de PLA de 40 µm.....	23
Figura 9. Preparación del material de ensayo (PLA de 40 µm) para los reactores sintéticos y Takakura.....	24
Figura 10. Caja de polipropileno para los reactores con compost sintético.....	25
Figura 11. Caja semicalada de plástico para los reactores con el compost Takakura.....	25
Figura 12. Balanza de precision T - Scale PRW del laboratorio de Investigaciones Varias de la EIB - UCR.....	26
Figura 13. Equipos para determinar la masa seca de cada componente del compost sintético.....	27
Figura 14. Elaboración de la matriz de compost sintético.....	29
Figura 15. Preparación de los reactores con la matriz sintética.....	30
Figura 16. Incubadoras del laboratorio de Bioenergía usadas para el compostaje sintético.....	31
Figura 17. Materia prima para el compostaje Takakura, proporcionada por la UGA de la UCR.....	34
Figura 18. Refuerzo del compost artesanal tipo Takakura.....	35
Figura 19. Preparación del compost artesanal tipo Takakura.....	36
Figura 20. Preparación de los reactores con la matriz Takakura.....	37
Figura 21. <i>Incubadora con agitación orbital digital Thermo Scientific modelo MaxQ 4450.</i>	38
Figura 22. Sensores de temperatura usados para el monitoreo del proceso de compostaje.....	39
Figura 23. Horno mufla del laboratorio de Investigaciones Varias.....	40

Figura 24. Cápsulas de aluminio para resguardo de muestras en el equipo de DSC.....	42
Figura 25. Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk) de Microsoft Excel 2013 - Real Statistics.....	45
Figura 26. Prueba de Homogeneidad de Varianza de Microsoft Excel 2013 - Real Statistics.....	46
Figura 27. Análisis de Varianza de un factor (ANOVA) ($\alpha = 0,05$) de Microsoft Excel 2013.....	47
Figura 28. Prueba de comparación múltiple de Dunn con corrección de Bonferroni ($\alpha = 0,05$) de Microsoft Excel 2013.....	49
Figura 29. Materiales húmedos del compost sintético dentro de recipientes de aluminio para su secado en un horno de convección forzada.....	50
Figura 30. Materiales húmedos del compost sintético dentro de un horno de convección forzada.....	51
Figura 31. Materiales húmedos del compost sintético dentro de un desecador.....	51
Figura 32. Preparación reactores Takakura.....	52
Figura 33. Inspección visual del compostaje sintético durante 12 semanas.....	53
Figura 34. Aspecto visual de los reactores artesanales con compost Takakura.....	56
Figura 35. Inspección visual para el control de factores externos en el compostaje Takakura.....	57
Figura 36. Inspección visual de compostaje sintético y Takakura, control de micelios a lo largo del proceso.....	58
Figura 37. Método gravimétrico para el control de la humedad en los reactores con el compost sintético.....	59
Figura 38. Variación de la masa versus el tiempo a lo largo del compostaje sintético.....	60
Figura 39. Inspección sensorial por tacto para el control de humedad de los reactores con el compostaje Takakura.....	61
Figura 40. Temperaturas versus tiempo durante el proceso de compostaje sintético.....	62
Figura 41. Temperatura promedio durante el proceso de maduración en los reactores sintéticos.....	63
Figura 42. Temperatura versus tiempo durante el proceso de compostaje dentro de los reactores Takakura.....	64
Figura 43. Muestras de compost hidratados para la medición de pH.....	64
Figura 44. PLA 40 μm no degradado durante el proceso de compostaje Takakura.....	66

Figura 45. Caracterización en DSC del PLA de 40 μm de espesor antes del compostaje...	69
Figura 46. Determinación de la temperatura de cristalización del PLA de 40 μm antes del compostaje.....	70
Figura 47. Caracterización en DSC del PLA de 40 μm versus el tiempo para ambos tipos de compostaje (sintético y Takakura).....	71
Figura 48. <i>Variación en la transición vítrea del PLA de 40 μm de espesor en el compost sintético</i>	74
Figura 49. <i>Variación en el punto de fusión del PLA de 40 μm de espesor en el compost sintético</i>	75
Figura 50. Variación en la transición vítrea del PLA de 40 μm de espesor dentro del compost Takakura.....	76
Figura 51. Variación en el punto de fusión del PLA de 40 μm de espesor dentro del compost Takakura.....	77
Figura 52. Espectro infrarrojo del PLA de 40 μm de espesor antes del compostaje.....	79
Figura 53. Variación de la absorbancia del PLA versus el número de onda en el compostaje Takakura.....	82
Figura 54. Absorbancia del PLA de 40 μm de espesor a las 12 semanas en el compostaje Takakura.....	83
Figura 55. Transmitancia del PLA de 40 μm de espesor a las 12 semanas en el compostaje Takakura.....	83
Figura 56. Variación de la absorbancia del PLA versus el número de onda en el compostaje sintético.....	84
Figura 57. Absorbancia del PLA de 40 μm de espesor a las seis semanas en el compostaje sintético.....	85
Figura 58. Transmitancia del PLA de 40 μm de espesor a las seis semanas en el compostaje sintético.....	85
Figura 59. Evolución de las regiones amorfas (921 cm^{-1}) y cristalinas (957 cm^{-1}) del PLA de 40 μm en el compostaje sintético.....	87
Figura 60. Variación de las regiones amorfas (921 cm^{-1}) y cristalinas (957 cm^{-1}) del PLA de 40 μm en el compostaje Takakura en la semana 12.....	88
Figura 61. Análisis termogravimétrico para la caracterización inicial del PLA antes del compostaje.....	89
Figura 62. Análisis termogravimétrico del PLA a través del tiempo en el compost sintético y Takakura la última semana de muestreo.....	89

Figura 63. Imagen lateral de SEM para la caracterización del espesor del PLA de 40 μm antes del compostaje.....	90
Figura 64. Imagen de SEM de la vista frontal para analizar la uniformidad y homogeneidad para la caracterización del PLA de 40 μm antes del compostaje.....	91
Figura 65. Imágenes de SEM del PLA de 40 μm después de seis semanas en el compost sintético.....	92
Figura 66. Imágenes de SEM del PLA de 40 μm después del proceso de compostaje Takakura.....	93
Figura 67. DMTA del PLA de 40 μm previo al compostaje.....	94
Figura 68. Mapa de calor de significancia estadística de los valores p de los análisis de Dunn ($\alpha = 0,05$) de los resultados de abonos orgánicos.....	103
Figura 69. Sistema de invernaderos tipo casa malla para los ensayos de fitotoxicidad de los cultivos de arroz y cebolla en el LANOTEC ubicado en Pavas, San José, Costa Rica.....	105
Figura 70. Desarrollo fenológico de los cultivos de arroz en una casa malla ubica Pavas, San José, Costa Rica.....	106
Figura 71. Almacigos con semillas de cebolla.....	107
Figura 72. Cambio de cobertura en invernaderos del LANOTEC.....	108
Figura 73. Germinación (%) según el tipo de compost y la mezcla con tierra comercial a partir de las pruebas de fitotoxicidad de los compost sintéticos y Takakura en arroz.....	109
Figura 74. Número de plántulas perdidas en los compost sintéticos y Takakura para el cultivo de arroz.....	110
Figura 75. Biomasa (g) obtenida de los compost sintéticos y Takakura para el cultivo de arroz.....	111
Figura 76. Biomasa cosechada en las pruebas de fitotoxicidad de compost en el cultivo de arroz.....	112
Figura 77. Mapa de calor de significancia estadística de los valores p del análisis de Dunn ($\alpha = 0,05$) para los resultados de fitotoxicidad en arroz del compost sintéticos con PLA 40 μm de espesor.....	117
Figura 78. Mapa de calor de significancia estadística de los valores p del análisis de Dunn ($\alpha = 0,05$) para los resultados de fitotoxicidad en arroz del compost Takakura con PLA 40 μm de espesor.....	117
Figura 79. Relación dosis - respuesta para el largo de las raíces en pruebas de fitotoxicidad en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)......	119
Figura 80. Relación dosis - respuesta para el largo del tallo en las pruebas de fitotoxicidad en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)......	120

Figura 81. Relación dosis - respuesta para el desarrollo vegetativo del largo de las hojas en pruebas de fitotoxicidad en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)	121
Figura 82. Relación dosis - respuesta en la germinación del arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)	122
Figura 83. Relación dosis - respuesta del número de pérdidas en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)	123
Figura 84. Relación dosis - respuesta de la biomasa en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ingredientes para la preparación del sustrato Takakura.	14
Tabla 2. Procedimiento del compostaje.....	32
Tabla 3. Contenido de humedad y masa seca presente en los materiales para elaborar el compost sintético.....	50
Tabla 4. Masa de los componentes para la elaboración de la matriz sintética.....	52
Tabla 5. Temperaturas de trabajo dentro de los reactores con el compost Takakura durante el compostaje.....	63
Tabla 6. Resultados de pH a lo largo del proceso de compostaje.....	66
Tabla 7. Grado de desintegración del PLA 40 µm dentro del compostaje sintético y Takakura.....	67
Tabla 8. Disminución R del contenido total de SV al final del proceso de compostaje sintético y Takakura.....	68
Tabla 9. Métodos empleados en el DSC para la determinación de la temperatura de cristalización del PLA de 40 µm.....	69
Tabla 10. Caracterización del PLA de 40 µm durante el proceso de compostaje Takakura en DSC.....	72
Tabla 11. Caracterización del PLA de 40 µm durante el proceso de compostaje sintético en DSC.....	73
Tabla 12. Espectro infrarrojo del PLA de 40 µm de espesor antes del compostaje.....	80
Tabla 13. Análisis de abonos orgánicos del compost sintético obtenido en condiciones de laboratorio.....	96
Tabla 14. Análisis de abonos orgánicos del compost Takakura obtenido en condiciones de laboratorio.....	97
Tabla 15. Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) del pH para los diferentes compost.....	99
Tabla 16. Prueba de Homogeneidad de Varianza ($\alpha = 0,05$) para los Análisis de Suelos de los compost sintéticos y Takakura.....	100
Tabla 17. Prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) para los Análisis de Suelos de los compost sintéticos y Takakura.....	101
Tabla 18. Prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) para los Análisis de Suelos según tipo de compost.....	102
Tabla 19. Largo de las raíces, tallos y hojas como resultado de las pruebas de fitotoxicidad de compost en el cultivo de arroz.....	113

Tabla 20. Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) en el largo de las raíces como resultado de las pruebas de fitotoxicidad de los compost en el cultivo de arroz.....	114
Tabla 21. Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) en el largo de los tallos como resultado de la prueba de fitotoxicidad de los compost en el cultivo de arroz.....	114
Tabla 22. Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) en el largo de las hojas como resultado de la prueba de fitotoxicidad de los compost en el cultivo de arroz.....	115
Tabla 23. Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) para el compost sintético y Takakura.....	116

LISTA DE ABREVIATURAS

A: Absorbancia (u.a.)
AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación
ASTM: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
ANOVA: Análisis de Varianza de un factor
B: Boro
BAL: Bacterias ácido lácticas
CE: Conductividad eléctrica
CeNAT: Centro Nacional de Alta Tecnología
C: Carbono
C/N: Relación carbono nitrógeno
Ca: Calcio
CH: Contenido de Humedad (%)
CH₄: Metano
CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas
CO: Monóxido de carbono
CO₂: Dióxido de carbono
CONARE: Consejo Nacional de Rectores
Cu: Cobre
D: Grado de desintegración (%)
(DM)_{fr}: Masa seca final del compost (%)
(DM)_{ir}: Masa seca inicial del residuo sintético o Takakura (%)
DMA: Análisis Dinámico Mecánico
DSC: Calorimetría de Barrido Diferencial
DTG: Curvas de análisis termogravimétrico diferencial
EIB: Escuela de Ingeniería de Biosistemas
FDA: Administración de Alimentos y Medicamentos
Fe: Hierro
FT-IR: Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier
H: Valor H de Kruskal-Wallis
H₂O: Óxido de dihidrógeno o Agua
IGES: Instituto de Estrategias Ambientales Globales
JICA: Japan International Cooperation Agency
k: Número de grupos analizados
K: Potasio
KITA: Asociación Internacional de Cooperación Técnica de Kitakyushu
LMS: Larva de mosca soldado
m_{fr}: Masa final del compost
Mg: Magnesio
MH: Masa Húmeda (g)
M_{fr}: Masa húmeda de cada componente antes del proceso de secado (g)
m_i: Masa seca inicial del material de ensayo
m_{ir}: Masa inicial del residuo sintético o Takakura húmedo introducido en el reactor
Mn: Manganeseo
m_r: Masa seca del material de ensayo residual recuperado del tamizado
MS: Masa Seca (%) o (g)

M_s : Masa seca de cada componente (g)
 n : Número de datos
 n_j : Número de datos por grupo
 N_2 : Nitrógeno
 NH_3 : Amoníaco
 PBAT: Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato)
 pH: Potencial de hidrógeno
 PLA: Ácido Poliláctico
 P: Fósforo
 PP: Polipropileno
 O_2 : Oxígeno
 ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenibles
 OECD: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
 Q: Calor (J/g)
 R: Disminución contenido de sólidos volátiles (%)
 R_j : Sumatoria de rangos por grupos
 S: Azufre
 SEM: Microscopía Electrónica de Barrido
 SINEC: Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad
 SV: Sólidos volátiles (%)
 T: Transmitancia (%)
 T_{cc} : Temperatura de cristalización (°C).
 T_g : Transición vítrea (°C)
 TG: Curva de termograma
 TGA: Análisis Termogravimétricos
 T_m : Punto de fusión (°C)
 T_{mp} : Temperatura pico de fusión (°C)
 UCR: Universidad de Costa Rica
 UGA: Unidad de Gestión Ambiental
 $(VS)_{ir}$: Contenido inicial en sólidos volátiles del residuo sintético o Takakura (%)
 $(VS)_{fr}$: Contenido final de sólidos volátiles del compost (%)
 χ^2 : Valor chi-cuadrado
 Zn: Zinc
 ΔH : Cambio de entalpía (J/g)

1. RESUMEN

Este estudio evaluó la biodegradabilidad del ácido poliláctico (PLA) de 40 µm de espesor bajo condiciones controladas de laboratorio, conforme a lo establecido por las normas ISO 20200:2004 y EN 13432:2000. Se diseñaron y compararon dos tipos de matrices de compostaje: una sintética, elaborada según estas normas, y otra artesanal, basada en el método Takakura.

Los resultados demostraron que el PLA alcanzó un 100 % de biodegradación en los sistemas sintéticos después de 90 días de compostaje, mientras que en los sistemas artesanales tipo Takakura solo se registró una descomposición del 4,41 %. Esta diferencia se atribuye principalmente a las temperaturas alcanzadas que corresponden a 56 °C en los reactores sintéticos, frente a 27 °C en los artesanales. Esta última resultó ser una temperatura insuficiente para activar la hidrólisis del polímero.

Los análisis físico - químicos y espectroscópicos (DSC, FTIR, TGA, SEM y DMA) evidenciaron modificaciones estructurales en el PLA en ambos sistemas de compostaje, aunque de distinta magnitud. Una pérdida significativa de las propiedades térmicas y mecánicas se observó en los reactores con el compost sintético; mientras que en los reactores con Takakura los cambios fueron menos perceptibles. Se podría afirmar que estos cambios fueron parciales y limitados.

Tras 12 semanas de compostaje artesanal, la caracterización térmica del PLA mediante DSC no evidenció pérdidas en sus transiciones térmicas, aunque sí se observó una disminución en la energía requerida para dichos procesos, con reducciones del 47,62 y 47,74 % en la transición vítrea y el punto de fusión, respectivamente. Los espectros infrarrojos (FTIR) mostraron una reducción del 45,12 % en la absorbancia del grupo carbonilo, mientras que el TGA reportó una leve disminución (~2,96 %) en la temperatura crítica de degradación del polímero.

Por su parte, luego de seis semanas de compostaje sintético, la transición vítrea desapareció y el punto de fusión presentó una reducción del 21,81 % en la entalpía, con un desplazamiento de la temperatura pico de fusión de 155,02 a 145,25 °C. La absorbancia del grupo carbonilo se redujo en un 6,23 %, influenciada por la cristalización inducida durante el proceso de compostaje. En este caso, el TGA evidenció una reducción más significativa en la temperatura crítica de degradación, del 30,91 %.

Ambos tipos de compost alcanzaron una reducción ≥ 30 % en los sólidos volátiles, cumpliendo con los criterios de madurez orgánica establecidos. Sin embargo, los análisis de calidad de abonos y las pruebas de fitotoxicidad indicaron que el compost obtenido de todas las muestras se clasifica como Abono Clase B, debido a concentraciones elevadas de metales como hierro (7140 y 8082 mg/kg en compost sintético y artesanal, respectivamente), cobre (186 y 190 mg/kg), zinc (150 y 149 mg/kg) y manganeso (170 y 180 mg/kg), así como a una deficiencia de boro (17 y 16 mg/kg, respectivamente). Además, el compost Takakura presentó una conductividad eléctrica considerablemente alta, lo que generó efectos fitotóxicos en las plántulas de arroz.

Las pruebas de fitotoxicidad en el cultivo de arroz, confirmaron que el compost sintético con PLA, mezclado en proporciones adecuadas con tierra comercial, favorece el desarrollo vegetal. En contraste, el compost Takakura tuvo un efecto negativo sobre las plántulas, posiblemente por su alta conductividad eléctrica y no por la presencia del polímero. Asimismo, los análisis estadísticos demostraron que no existen diferencias significativas entre los sistemas de compostaje con PLA y sus respectivos controles.

En conclusión, el PLA de 40 µm es biodegradable y compostable en sistemas sintéticos bajo condiciones controladas de laboratorio, de acuerdo con la norma ISO 20200:2004. No obstante, no presenta una biodegradación efectiva en el sistema Takakura durante el período evaluado. Además, la presencia del PLA no generó impactos negativos significativos ni en la calidad del compost ni en el desarrollo de las plantas.

Palabras claves: Biodegradación. Biopolímero, Caracterización, Empaque de alimentos, Sostenibilidad.

2. INTRODUCCIÓN

El compromiso con el medio ambiente a la hora de consumir un bien o servicio se ha vuelto un requisito para el comprador al momento de seleccionar un producto. Rives Castillo et al. (2020), explican que esto ha generado que las empresas empiecen a realizar cambios en sus productos y procesos, para implementar la economía circular, maximizando así el valor y la utilidad de los recursos a través del diseño de sistemas y materiales más eficientes elaborados a partir de residuos.

El concepto de *usar y tirar* se traduce en problemas ambientales y socioeconómicos. Para el 2024, la generación global de desechos plásticos era de 220 millones de toneladas, lo cual equivale a un promedio de 28 kg/persona (Earth Action, 2024); con un 40 % proveniente de envases según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OECD] (2022). Este material, comúnmente denominado plástico convencional, tiene un tiempo de vida prolongado debido a su composición química, por lo que, su degradación puede tardar entre 100 y 1.000 años (Andrade et al., 2018).

Ante la necesidad de reducir el impacto ambiental surgen los empaques biodegradables; y si bien es cierto su presencia en el mercado es baja, su demanda y producción sigue creciendo (Navia & Villada, 2013; Rives Castillo et al., 2020). Se prevé que para el 2025 el valor de la industria de polímeros biodegradables rondará los 11.780,00 millones de dólares y que entre el periodo de los años 2025 - 2037 su tamaño crezca 118.040,00 millones de dólares (Baghel, 2025). Sin embargo, varios estudios han demostrado que no todos los biomateriales son biodegradables y compostables. Además, la degradación de estos depende más de las condiciones en las que se almacenan o tratan, que de las estructuras moleculares que los conforman. Por ello, estos materiales no necesariamente son mejores para el medio ambiente a menos que se garanticen las condiciones requeridas para su degradación (Ruiz et al., 2013).

Algunos de los materiales desechables que actualmente se comercializan como *biodegradables*, realmente lo son en las condiciones necesarias de composteo estipuladas por la norma de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés, 2023); y es probable que no lo sean en los sistemas caseros de composteo, que son una de las formas de aprovechamiento de desperdicios a pequeña escala más fácilmente ejecutados (Ruiz et al., 2013). Debido a esto, se requiere realizar mayor investigación en esta área, a fin de determinar las condiciones prácticas para la descomposición de los materiales y obtener una biodegradación satisfactoria (Ruiz et al., 2013).

En Costa Rica, la generación de residuos sólidos biodegradables representa del 44 al 52 % del total de residuos sólidos generados. Por este motivo, se deben desarrollar estrategias de economía circular donde se aprovechen dichos residuos y se brinde una solución económica, eficiente, segura y que aporte en la disminución de carbono equivalente (Chaves Arias et al., 2019). Estas acciones se alinean con los objetivos del Plan Nacional de Compostaje 2020 - 2025 y dan respuesta a la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Ley No. 8839), que surge como una demanda de diversos sectores, públicos y privados, ante la urgente necesidad de una solución definitiva y sostenible al problema de los residuos en el país (Ministerio de Salud de Costa Rica, 2016).

Entre los materiales más utilizados para elaborar empaques biodegradables se encuentra el ácido poliláctico (PLA), elaborado a partir de la polimerización de ácido láctico, un monómero obtenido a partir de la fermentación de azúcares simples, en condiciones controladas de temperatura, oxígeno y pH. Tras su fermentación, el monómero debe ser purificado para posteriormente sintetizar el polímero. El PLA de alto peso molecular ($M_w > 10,000$), se puede obtener a partir de tres métodos: una condensación directa, la deshidratación azeotrópica y, principalmente, la polimerización por apertura de anillo (ROP) de lactida, preferida por su eficiencia y control en la calidad del polímero (Li et al., 2020). Este material tiene un gran interés y considerable demanda en el mercado; y actualmente es el más común. Además, tiene un alto potencial para ser utilizado en la industria de

envases alimenticios (Rives Castillo et al., 2020).

Por otra parte, los sistemas de compostaje artesanales, como el método Takakura, representan una alternativa frente a los modelos de compostaje estandarizados o comerciales. Cabe mencionar que los compostajes caseros tienen ciertos beneficios ambientales asociados al consumo de energía y agua, para reducir la toxicidad potencial, la eutrofización y emisión de gases de efecto invernadero, en comparación con el compostaje industrial y la disposición de residuos en vertederos (Borrero González et al., 2016). Además, el compost Takakura, debe ser constantemente alimentado con desechos orgánicos ordinarios. Por lo tanto, no solo cuenta con la ventaja de la posible degradación de empaques biodegradables, sino además disminuye los desechos orgánicos. Esto lo convierte en una buena opción a ser analizada pues contribuye a fomentar la economía circular desde el hogar, disminuyendo las emisiones de gases efecto invernadero, la acumulación de desechos en los vertederos y los recursos destinados a la gestión de residuos sólidos.

Por tal motivo, el presente estudio desea aportar a la sociedad en la generación de conocimiento y herramientas para potenciar la economía circular e incentivar la gestión de residuos sólidos desde el hogar, por medio de metodologías económicas, sociales y ambientalmente responsables. Pues se considera que el compostaje a escala casera es una estrategia fundamental para el cumplimiento de estos objetivos (Torrez, 2023). Para ello, se plantea como objetivo general analizar el grado de desintegración y calidad del compost obtenido del proceso de compostaje, en condiciones controladas, a partir de dos tipos de tratamientos (inóculos tipo comercial y Takakura) del polímero biodegradable PLA de 40 μm de espesor, utilizado para el empaque de alimentos.

Este trabajo tiene suma importancia para el fortalecimiento de la aplicación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como se puede apreciar en el Anexo 1 y en especial los ODS 11, 12 y 13. Además, esta investigación presenta como innovación el estudio de la degradación de biopolímeros en sistemas de compostaje caseros, utilizando un inóculo comercial y otro artesanal, y evaluando la degradación mediante técnicas de caracterización como: espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétricos (TGA), análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis dinámico mecánico (DMA); que posee el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC). Esta información es importante pues existen pocos estudios que investiguen la biodegradación del PLA en estos sistemas de compostaje a nivel nacional.

El LANOTEC realizó previamente con las carreras de Ingeniería de Alimentos y la Escuela de Ingeniería de Biosistemas (EIB) de la Universidad de Costa Rica (UCR), una investigación sobre la evaluación de la degradación de plásticos compostables utilizados como empaques de alimentos en composteras domésticas. Estas investigaciones usaron PLA de 20 μm en compostaje con inóculos comerciales y recomendaron la evaluación de espesores mayores, así como la evaluación de otros tipos de compost. De esta forma, los resultados obtenidos de este vínculo Universidad - Consejo Nacional de Rectores (CONARE) - Industria - Sociedad son relevantes para poder establecer los parámetros óptimos para el compostaje de polímeros biodegradables en condiciones controladas (Torrez, 2023).

Estos análisis (Torrez, 2023) son un aporte para evaluar el impacto ambiental a largo plazo de los materiales biodegradables y encontrar soluciones reales para evitar la acumulación de polímeros en el medio ambiente. Por otro lado, según el mismo estudio, esta información sirve para el establecimiento y fortalecimiento del marco legal enfocado en los sistemas de gestión de residuos sólidos, especialmente de los empaques compostables, brindando las pautas necesarias para el adecuado manejo y su valorización a partir de la generación de estos desechos. Además, al realizar la evaluación con el tratamiento de inóculo Takakura, se genera conocimiento para la gestión de empaques poliméricos biodegradables utilizados en la industria de alimentos y se fomenta una estrategia de economía circular y se aporta al Plan Nacional de Compostaje 2020 - 2025 donde se aprovechan los residuos sólidos orgánicos biodegradables.

Se debe mencionar que este estudio vincula dos áreas de la EIB de la UCR. La primera está enfocada en el área de Ingeniería de Sistemas Productivos e Ingeniería del Recurso Hídrico, Suelos y Ambiente ya que involucra el manejo y tratamiento de residuos. Asimismo, aporta en la generación del conocimiento de sistemas de compostaje para empaques biodegradables implementados en la industria de alimentos. Finalmente, la segunda está vinculada con la Ingeniería de Sistemas Productivos, materiales biodegradables y metodologías como el compostaje. El compost resultante de la transformación biológica y control de los materiales orgánicos tiene un potencial uso como sustrato, enmienda o fertilizante en actividades agrícolas, o bien como una materia estabilizada (Secretaría del Consejo Nacional Ambiental, 2020). Desde la perspectiva de Ingeniería del Recurso Hídrico, Suelos y Ambiente, así como de la salud pública, es importante una adecuada gestión de los residuos en las distintas etapas posteriores a su generación para reducir el impacto negativo sobre el medio ambiente y la salud; y disminuir la presión sobre los recursos naturales (Torrez, 2023).

3. OBJETIVOS

3.1. *Objetivo general*

Analizar el grado de desintegración y calidad del compost obtenido del proceso de compostaje, en condiciones controladas, de dos tipos de tratamientos (inóculos comercial y Takakura), del polímero biodegradable PLA de 40 µm de espesor utilizado para el empaque de alimentos.

3.2. *Objetivos específicos*

1. Cuantificar el grado de desintegración y el proceso de compostaje, en condiciones controladas, dos tipos de tratamientos (inóculo comercial y Takakura) del polímero biodegradable PLA de 40 µm, utilizado como material de empaque para alimentos, según la Norma ISO 20200:2004.
2. Evaluar la influencia de la degradación del polímero biodegradable PLA de 40 µm utilizado como material de empaque para alimentos en la composición de dos tipos de compost (comercial y Takakura), mediante análisis de abonos orgánicos en condiciones de laboratorio, según la Norma ISO 20200:2004.
3. Analizar la calidad del compost producido de la degradación/desintegración del polímero biodegradable PLA de 40 µm, usado como material de empaque para alimentos, mediante ensayos de fitotoxicidad en laboratorio, según la Norma EN 13432:2000.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Antecedentes

Costa Rica en el 2017, por medio de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos número 8839 y su reglamento, decreto 37567, establece la estrategia nacional de sustitución de plásticos de un solo uso por alternativas renovables y compostables 2017-2021 (Ministerio de Salud y Energía et al., 2017). Asimismo, el Gobierno de la República ha impulsado proyectos como: el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021, la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2010-2021 y el Plan de Acción para la Gestión Integrada de Residuos 2019-2022; donde se considera un Plan Nacional de Compostaje para eliminar la materia orgánica en los rellenos sanitarios nacionales para el 2030 y sensibilizar a la sociedad para su adecuado manejo (Torrez, 2023).

Bajo estos objetivos, a nivel internacional, investigadores en México evaluaron materiales biodegradables en sistemas de vermicompostaje a pequeña escala, entre estos el PLA. Los resultados demostraron que el sistema no logró llegar a las condiciones necesarias ($T > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) para que se diera la hidrólisis en la estructura molecular del PLA e iniciar la biodegradación, al manejar temperaturas de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ruiz et al., 2013). Por otro lado, en una investigación realizada en Colombia se demostró la viabilidad de la implementación en la agricultura del compost, el material resultante de la biodegradación de lodo paplero Kraft en sistemas de vermicompostaje (Romero-Conrado et al., 2017).

A nivel nacional, se han evaluado diferentes tipos de tratamiento de compostaje artesanal con residuos sólidos biodegradables para la generación de abono orgánico. En un estudio, realizado por Chaves Arias et al. (2019), se demostró que el método Takakura alcanzó una temperatura promedio de $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ y fue el mejor sistema de compostaje entre los tratamientos evaluados. También se han realizado comparaciones de factibilidad técnica, ambiental y económica en tratamientos de compostaje donde se ha recomendado el Takakura como la mejor opción (Borrero González et al., 2016; Ramírez Ramírez et al., 2016). Con respecto a la evaluación de la calidad del compost resultante, se ha determinado que se puede obtener un mejor producto con el método Takakura, en comparación con otros tratamientos evaluados como los microorganismos de montaña o pellets (Campos Rodríguez et al., 2016). Adicionalmente, se ha evaluado el método Takakura en la generación de abono, y se determinó que es capaz de reducir el 50 % de los desechos orgánicos generados en un hogar (Gómez et al., 2022).

Por otra parte, Solano et al. (2022) recolectaron muestras comerciales de plástico comercializadas como *biodegradables* (PLA incluido) para los consumidores en Costa Rica. Posteriormente, compararon la biodegradación de estos plásticos en recipientes de compostaje doméstico en condiciones tropicales ($\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$) para evaluar las diferencias en la producción de compuestos de biodegradación y los cambios en la composición microbiana. Los resultados después de 31 semanas de composteo determinaron que ninguno de los materiales se biodegradó, por lo que no se consideran compostables en dichas condiciones. En consecuencia, estos materiales tampoco deben considerarse inocuos para el medio ambiente como se presenta.

Un estudio desarrollado en la UCR en colaboración con el CeNAT-LANOTEC evaluó la biodegradación de empaques para alimentos biodegradables en compost comercial. Los empaques previamente evaluados fueron de PLA y PBAT (de $20\text{ }\mu\text{m}$ ambos) a escala de laboratorio (Torrez, 2023) y en condiciones de compostaje casero (Segura, 2023). Los resultados mostraron que la degradación de los empaques dependía más de los sistemas de compostaje empleados que de la estructura molecular del material. Específicamente, Torrez (2023) reportó una degradación del 100 % para el PLA de $20\text{ }\mu\text{m}$ y 99,43 % para el Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT) de $20\text{ }\mu\text{m}$ en un sistema de compostaje sintético. En los sistemas de compostaje rotatorios, Segura (2023) observó una degradación del 97,54 % en el PLA de $20\text{ }\mu\text{m}$ y de 46,34 % en el PBAT de $20\text{ }\mu\text{m}$. Por último, en los

reactores tipo caja, la degradación fue de apenas 6,07 % para el PLA y 20,58 % para el PBAT. Por ello, tanto Torrez (2023) como Segura (2023) recomiendan realizar más estudios con materiales de un mayor espesor de empaque y en diferentes sistemas de compostaje.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se busca responder a las recomendaciones realizadas por Torrez (2023) y Segura (2023), mediante el análisis del proceso y calidad del compost obtenido de la degradación del PLA de 40 µm en dos sistemas de compostaje; uno artesanal (Takakura) y uno estándar/sintético (comercial). Esta investigación también busca incentivar la gestión responsable de residuos sólidos orgánicos en el hogar, por medio de metodologías económicas, sociales y ambientalmente responsables.

De forma específica, el estudio pretende dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿es el PLA de 40 µm de espesor realmente biodegradable tanto en sistemas de compostaje comercial como en el artesanal, tipo Takakura, cumpliendo con lo estipulado por la Norma ISO 20200:2004, particularmente el plazo de degradación de 90 días? ¿Se detectan efectos fitotóxicos en las enmiendas obtenidas del compostaje del PLA de 40 µm de espesor? ¿Existen diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a la eficacia del proceso de degradación y calidad del compost resultante?

4.2. Fundamentos teóricos y referencias conceptuales

4.2.1. Norma UNE-EN 13432

Con el fin de ahorrar recursos y minimizar los residuos, debería optimizarse todo el sistema de disposición de residuos en el que los envases o embalajes forman parte. La norma UNE-EN-13432 extiende los requisitos que se deben tomar en cuenta para considerar un envase o embalaje como valorizable con respecto a la recuperación orgánica; por ejemplo el compostaje aerobio, como una de las opciones de recuperación posibles dentro del ciclo de vida completo del envase o embalaje (Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR], 2001). Esta norma especifica los requisitos y procedimientos para determinar la compostabilidad y la tratabilidad anaerobia de los envases o embalajes y materiales de envase o embalaje señalando cuatro características:

1. Biodegradabilidad.
2. Desintegración durante el tratamiento biológico.
3. Efecto sobre el proceso de tratamiento biológico.
4. Efecto sobre la calidad del compost resultante.

4.2.2. Empaques para alimentos

El objetivo de los empaques para alimentos es la contención, protección, manipulación, distribución y presentación de los productos (AENOR, 2001). Los empaques deben proteger los productos de estímulos externos y de factores que promuevan el daño y el deterioro, así como, conservar las características (atributos de los productos) y servir de plataforma física para comunicar los beneficios que otorga el contenido del mismo a los consumidores (Andrade et al., 2018). A modo general, se pueden clasificar en tres tipos: primario, secundario y terciario (Rives Castillo et al., 2020) y todos los materiales y sustancias químicamente puros de los que está compuesto un material de envase o embalaje, se consideran constituyentes de un material de envase (AENOR, 2001). Estos, son regulados por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) para asegurar que sean seguros para el contacto con alimentos bajo condiciones de intenso uso (Pardo et al., 2011).

4.2.3. Plásticos convencionales

Los plásticos convencionales son aquellos materiales no biodegradables de origen petroquímico (Ribba et al., 2020). Otros autores (Tijeras, 2017; Andrade et al., 2018) explican que estos materiales son sintetizados por macromoléculas de polímeros y que poseen un alto grado de resistencia al medio ambiente, siendo capaces de perdurar entre 100 y 1.000 años. Por este motivo, se consideran altamente contaminantes; y dado que su fuente es un recurso no renovable, se buscan cada vez más métodos alternativos para reemplazar el uso de polímeros convencionales por plásticos biodegradables.

4.2.4. Plásticos biodegradables

Los plásticos biodegradables están compuestos por materiales que pueden descomponerse mediante la acción de microorganismos, transformándose en compuestos simples como CO₂, H₂O, sales minerales y biomasa. Generalmente, son elaborados a partir de fuentes renovables y deben cumplir con normas específicas como la Norma UNE-EN 13432:2000 (AENOR, 2001), que establece los requisitos para su biodegradación final. Esta norma define la biodegradación como la descomposición de compuestos químicos orgánicos por microorganismos, en condiciones aeróbicas (en presencia de O₂) o anaeróbica (ausencia de O₂), generando CO₂, CH₄, sales minerales y nueva biomasa (Rivera et al., 2019; Pardo et al., 2011).

La medición de este proceso se realiza mediante técnicas estandarizadas, como las establecidas en la norma ASTM D400-04, que determina el tiempo de degradación y los métodos de disposición final (Andrade et al., 2018). Factores como la estructura química del polímero, condiciones ambientales (temperatura, pH y humedad) y el tipo de microorganismos presentes en las enmiendas, pueden influir significativamente en la tasa de biodegradación. Por ello, es común que algunos plásticos biodegradables presenten tasas de degradación lentas o incluso inhibición en determinadas etapas (Solano et al., 2022).

4.2.5. Bioplásticos

Un bioplástico es un polímero fabricado a partir de recursos renovables. Estos materiales ofrecen ventajas ambientales frente a los plásticos convencionales, ya que reducen la dependencia de recursos fósiles y contribuyen a cerrar con el *ciclo de vida* de los productos, permitiendo incluso el aprovechamiento de residuos orgánicos. En muchos casos los bioplásticos también son biodegradables y compostables, ya que presentan una menor resistencia a la actividad microbiana y una alta solubilidad en agua. Su degradación, al igual que otros materiales biodegradables, depende de la presencia o ausencia de O₂ en el medio, generando diferentes subproductos según las condiciones, como los expuestos en la sección 3.2.4 (Hidalgo, 2012; Ortiz Gómez et al., 2015; Meneses & Aguilar Calle, 2022).

4.2.6. Plásticos compostables

Un plástico compostable, según la ASTM (2023), es aquel plástico que cumple con ciertos criterios bajo condiciones específicas de compostaje aeróbico en instalaciones municipales o industriales. Estos criterios incluyen:

1. *Biodegradación*: el material debe descomponerse por actividad microbiana a una velocidad comparable a la de materiales compostables conocidos, como el papel o residuos orgánicos.
2. *Desintegración*: el material debe fragmentarse hasta ser irreconocible en el compost resultante.

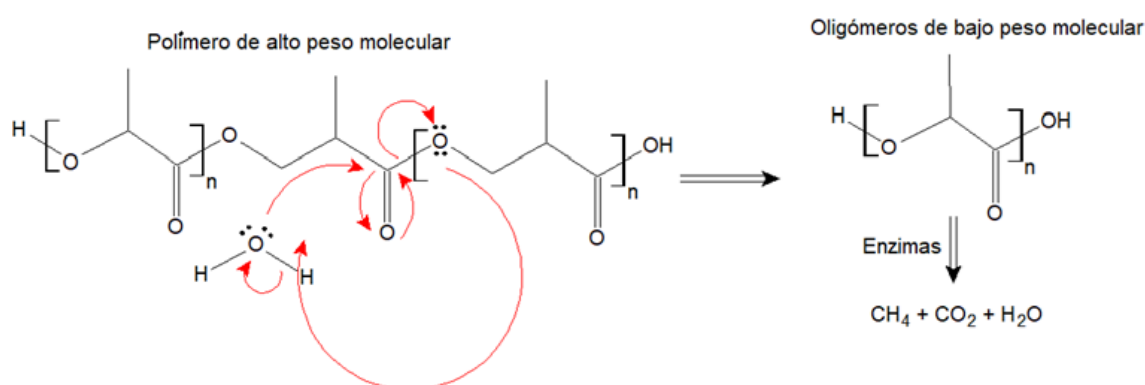
3. *Ausencia de toxicidad*: el compost resultante debe ser apto para el crecimiento de plantas, asegurando que no hayan efectos tóxicos sobre el ambiente.

4.2.7. Ácido poliláctico (PLA)

El PLA se caracteriza por su gran biodegradabilidad bajo condiciones controladas a diferencia de otros termoplásticos, reduciendo de esta manera el tiempo que pasa el producto en la tierra (Meneses & Aguilar Calle, 2022). Estudios previos han demostrado que este biopolímero debe almacenarse a $\sim 58^{\circ}\text{C}$ para reducir el peso molecular a partir de hidrólisis en su estructura e iniciar el proceso de biodegradación (Figura 1) (Ruiz et al., 2013; Murillo Vargas et al., 2020).

Figura 1

Degradación hidrolítica del PLA



Nota: Recuperado de Murillo Vargas et al. (2020).

El PLA se forma a partir de la unión repetitiva de monómeros de ácido láctico. Este ácido láctico, Li et al. (2020), explican que se obtiene principalmente mediante la fermentación microbiana de azúcares simples, como la glucosa, lactosa, maltosa o almidón, los cuales provienen comúnmente del maíz y la papa. Este proceso se realiza en condiciones controladas: durante 3 a 5 días, a $\sim 40^{\circ}\text{C}$, en un ambiente con bajo contenido de oxígeno y un pH ácido (alrededor de 5,0). Al finalizar el proceso, se obtiene una mezcla que contiene ácido láctico junto con otros subproductos, por lo que es necesario purificarlo para su uso en aplicaciones médicas, alimentarias o para la síntesis de PLA.

Entre los métodos de purificación tradicionales se encuentran la neutralización del ácido con hidróxido de calcio o carbonato de calcio, lo cual produce lactato de calcio. Este compuesto puede luego tratarse mediante cristalización y acidificación para recuperar el ácido láctico. También es posible utilizar agentes alcalinos como amoníaco reciclado o hidróxido de sodio para lograr la neutralización. Con el avance tecnológico, se han implementado técnicas más eficientes y sostenibles como la ultrafiltración, la decoloración y la electrodiálisis, que permiten obtener ácido láctico de alta pureza a menores costos (Li et al., 2020).

Existen métodos químicos industriales para producir ácido láctico que emplean compuestos como lactonitrilo, acrilonitrilo o ácido propiónico. Aunque son eficaces y permiten producción a gran escala, implican el uso de materias primas tóxicas y poco sostenibles. Por ello, están en desventaja frente a métodos más ecológicos. Como alternativa, se ha propuesto un proceso biotecnológico más limpio y eficiente: la sacarificación y fermentación simultáneas, en el que bacterias y enzimas convierten directamente biomasa (almidón o celulosa) en ácido láctico. Esta estrategia ofrece mayor sostenibilidad, menores costos y mejor rendimiento (Li et al., 2020).

Específicamente para la síntesis de PLA de alto peso molecular ($M_w > 10,000$), después de la obtención del monómero de ácido láctico, existen tres rutas principales (Li et al., 2020):

1. *Condensación directa*: sencilla pero limitada en la longitud de cadena.
2. *Deshidratación azeotrópica*: mejora la eficiencia de la condensación.
3. *Polimerización por apertura de anillo (ROP) de lactida*: la más utilizada a escala industrial por su capacidad de producir PLA de alta calidad y control sobre el peso molecular.

Según la empresa distribuidora del empaque, no se ha reportado toxicidad para animales o humanos (teratogenicidad, embriotoxicidad, mutagenicidad y toxicidad reproductiva). Sin embargo, un estudio de 2025 investigó la exposición crónica a micro y nano plásticos de PLA en ratones machos. Los resultados mostraron una disminución en la concentración y motilidad espermática, aumento en la tasa de espermatozoides anormales y alteraciones hormonales. Se observó que las nanopartículas de PLA pueden atravesar la barrera hemato-testicular, afectando la espermatogénesis y la función mitocondrial en los testículos (Zhao et al., 2025). Aunque los estudios en humanos son limitados, investigaciones in vitro han demostrado que implantes de PLA degradados pueden provocar encapsulación fibrosa y atracción de macrófagos y células gigantes, lo que sugiere una respuesta inflamatoria del organismo (Li et al., 2015).

Debido a lo anterior, este material se debe mantener alejado de fuentes de fuego, productos calentados o fundidos durante la manipulación. Se debe lavar cuidadosamente la piel, ojos o cualquier área de contacto después de la manipulación; y evitar su ingesta o el contacto con la ropa. En cuanto al almacenamiento, este debe ser en un lugar fresco, seco y bien ventilado y protegido de fuentes de ignición, agentes oxidantes fuertes, calor excesivo y luz solar directa. Se debe mantener el recipiente cerrado cuando no esté en uso y proteger del daño físico.

Según el fabricante, el material presenta un aspecto laminar blanco y translúcido. Es insoluble en agua, tiene una gravedad específica ($H_2O = 1$) de 1,25 y un punto de fusión entre 140 - 170 °C. Al combustionar se puede producir CO_2 y CO. El empaque se considera estable en condiciones normales, no tiene una polimerización peligrosa y no es corrosivo para los metales.

4.3. Microorganismos en el proceso de compostaje

La descripción de los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje es complicada, debido a que las poblaciones y las comunidades varían continuamente en función de la evolución de la temperatura, nutrientes, oxígeno, contenido de agua, pH, entre otros. Sin embargo, los microorganismos que más participan en el proceso son hongos y actinomicetos por su capacidad para degradar residuos de plantas y animales como celulosa, quitina y pectina (Camacho et al., 2014). Por otro lado, en relación a la eficiencia en los sistemas de compostaje de calidad, varios autores han determinado cinco grandes grupos de los microorganismos benéficos para la degradación de materia orgánica, los cuales son (Condori, 2022):

1. *Bacterias ácido lácticas (BAL)*, por ejemplo *Lactobacillus* (*L. plantarum*, *L. casei*), *Bidobacterium*, *Lactococcus*, *Streptococcus* (*S. lactis*) y *Pediococcus*. Estas fermentan los azúcares para producir el ácido láctico, que ayuda a bajar el pH y crea un ambiente desfavorable para los microorganismos patógenos (Parra, 2010), como *Fusarium*, que tiende a aparecer en los sistemas de producción de compost (Durand, 2023).
2. *Bacterias fotosintéticas*, por ejemplo *Rhodospseudomonas palustris*, *Rhodobacter sphaeroides*, *R. palustris* y *R. sphaeroides*. Estas usan luz y materia orgánica para su metabolismo, produciendo nutrientes esenciales para otros microorganismos (Morocho y Leiva, 2019).

3. *Levaduras*, Morocho y Leiva (2019) explican que son microorganismos capaces de utilizar diversas fuentes de carbono (glucosa, sacarosa, fructosa, galactosa, maltosa, suero hidrolizado y alcohol) y energía. Varias especies del género *Saccharomyces* conforman esta comunidad microbiana, aunque prevalecen las especies *Saccharomyces cerevisiae* y *Candida utilis*. Estos microorganismos requieren como fuente de nitrógeno (N_2) el amoníaco (NH_3), la urea o las sales de amonio y mezcla de aminoácidos ya que no son capaces de asimilar nitratos ni nitritos. Además, como parte de los resultados del metabolismo de estos microorganismos, se tiene la síntesis de sustancias antimicrobianas como hormonas y enzimas que pueden ser utilizadas por las BAL; y etanol, el cual en elevadas concentraciones puede tener actividad antifúngica.
4. *Bacterias actinomicetas*, por ejemplo *Streptomyces albus* y *Streptomyces griseus*. Este tipo de bacterias ayudan a la descomposición de materiales orgánicos complejos y recalcitrantes, como la celulosa y la lignina y contribuyen al desarrollo del compost maduro (Durand, 2023).
5. *Hongos filamentosos*, por ejemplo *Aspergillus oryzae*, *Penicillium sp*, *Trichoderma sp* y *Mucor hiemalis* Wehmer. *A. oryzae*. Estos microorganismos son capaces de degradar la materia orgánica compleja, como los almidones, la lignina y la celulosa, en las etapas iniciales del compostaje; además de ser antagónicos de especies fitopatógenas (Morocho y Leiva, 2019).

Diversos estudios han identificado los principales grupos de microorganismos responsables de la degradación de polímeros biodegradables. Entre las bacterias más comunes se encuentran especies de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Streptomyces* y *Rhodococcus*, ampliamente distribuidas en suelos y ambientes compostables. En cuanto a los hongos, destacan *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* y *Trichoderma*, conocidos por producir enzimas como esterasas, lipasas y cutinasas, que facilitan la ruptura de las cadenas poliméricas. Estas comunidades microbianas desempeñan un papel fundamental en la mineralización de plásticos como PLA, PHB, PCL y PBAT, tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas (Shah et al., 2008). Específicamente, entre los microorganismos relacionados con la degradación de PLA, se pueden mencionar: *Fusarium moniliforme* (Torres et al., 1996), *Penicillium roquefort* (Pranamuda et al., 1997), *Amycolatopsis sp.* (Pranamuda and Tokiwa, 1999) *Bacillus brevis* (Tomita et al., 1999) y *Rhizopus delemer* (Fukuzaki et al., 1989).

4.4. Tipos de compost

El compostaje es un proceso aeróbico diseñado para producir compost (material estable e higienizado), por medio de un tratamiento biológico donde organismos mesófilos y termófilos transforman la materia orgánica en CO_2 , H_2O , NH_3 y compost, el cual puede influir positivamente al medio ambiente. Las variables de mayor interés son el pH, la temperatura, el tamaño de partículas y la humedad (AENOR, 2006; Chaves Arias et al., 2019; González Jiménez & Villalobos Morales, 2021). Este tratamiento puede realizarse por medio de inóculos artesanales (López Tolentino et al., 2022), endógenos (Vargas Sánchez et al., 2020) o comerciales (Delgado Arroyo et al. 2019).

Previo a la maduración del compost, ocurre una fase mesofílica de incubación a unos 25 °C, que favorece el desarrollo de microorganismos que crecen a temperatura ambiente (AENOR, 2006). Luego, se pasa al periodo de incubación termofílico, que se da a 58 °C para permitir el desarrollo de microorganismos que crecen a temperatura elevada (AENOR, 2006).

El compost es un acondicionador orgánico sólido obtenido por biodegradación de una mezcla que consta principalmente de residuos vegetales, ocasionalmente asociados a otro material orgánico y que tiene un contenido en minerales limitado (AENOR, 2006). La compostabilidad se refiere a la aptitud de un material para biodegradarse en un proceso de compostaje (AENOR, 2006). La desintegración es la rotura física de un material en fragmentos muy pequeños (AENOR, 2001; AENOR, 2006).

4.4.1. Compost sintético

El compost sintético se genera de un inóculo inicial. El inóculo debe proceder de un compost bien aireado producido en una instalación industrial de compostaje aeróbico. El inóculo del compost debe ser homogéneo y no debe presentar elementos inertes de gran tamaño tales como vidrio, piedras, o fragmentos de metal (AENOR, 2006). En la literatura este tipo de compost también se conoce como compost estándar o comercial.

Los desechos sintéticos tienen un olor ácido en los primeros dos o tres días del proceso. Luego, este se descompone gradualmente en olor a amoníaco entre el quinto y el décimo día. Este olor dura unos 10 días. Pasado este periodo no se debe detectar ningún olor especial, o solo el olor a tierra. En cuanto al aspecto visual, cambia en las dos primeras semanas, por lo que en este periodo se registra el crecimiento de micelios y la variación en el color del residuo sintético. Inicialmente, el color es ligeramente amarillo debido a la elevada concentración de aserrín, tornándose marrón en 10 días (AENOR, 2006; Torrez, 2023).

En cuanto al diseño experimental, este puede estructurarse mediante dos configuraciones principales: un sistema de compostaje al cual se incorpora el material que se desea evaluar, y un sistema control o blanco, que consiste en el compost generado en un proceso paralelo sin la adición del material de ensayo (AENOR, 2001). El material de ensayo para el presente estudio corresponde al biopolímero PLA 40 µm.

4.4.2. Compost artesanal

Los tipos de compostaje que representan una alternativa ante los estandarizados (comerciales) se denominan artesanales. Estos se caracterizan por emplear técnicas variadas como la adición de sustratos con microorganismos y macroorganismos como la implementación de microorganismos Takakura o de lombrices, respectivamente (Secretaría del Consejo Nacional Ambiental, 2020). Cabe mencionar que los compostajes caseros tienen muchos beneficios ambientales asociados al consumo de energía y agua, reducir la toxicidad potencial, la eutrofización y emisión de gases de efecto invernadero, en comparación con el compostaje industrial y la disposición de residuos en vertederos (Borrero González et al., 2016).

4.4.3. Método Takakura

Una de las técnicas de conversión de los residuos orgánicos del hogar en abono orgánico se conoce como el método Takakura. Los residuos se someten al compostaje de medios de cultivo de microorganismos adaptados al suelo y disponibles en el medio natural. Esta técnica consiste en utilizar microorganismos fermentadores que se pueden obtener localmente, como cáscaras de frutas, alimentos fermentados, salvado de arroz, cascarilla de arroz, estiércol, entre otros residuos orgánicos ordinarios del compostaje (Chaves Arias et al., 2019; Borrero González et al., 2016). Estos microorganismos trabajan en conjunto para descomponer la materia orgánica, controlando olores y acelerando el proceso de compostaje.

Higa y Parr (1994) explican que los microorganismos fermentativos se dividen según el tipo de descomposición que realizan, las cuales pueden ser: fermentación útil (simplemente llamada fermentación) y fermentación dañina (llamada putrefacción). Además, comentan que la fermentación es un proceso anaeróbico por el cual los microorganismos facultativos (por ejemplo, levaduras) transforman moléculas orgánicas complejas (por ejemplo, carbohidratos) en compuestos orgánicos simples que a menudo pueden ser absorbidos directamente por las plantas. Por otro lado, la putrefacción es el proceso donde los microorganismos heterótrofos facultativos descomponen las proteínas de manera anaeróbica, produciendo metabolitos malolientes y oxidados de manera incompleta (por

ejemplo, amoníaco, mercaptanos e indol) que a menudo son tóxicos para las plantas y los animales.

La preparación del sustrato Takakura consiste en dos etapas según lo establecido por la Asociación Internacional de Cooperación Técnica de Kitakyushu (KITA, por sus siglas en inglés) (Borrero, 2014; Instituto de Estrategias Ambientales Globales [IGES], 2010). La primera es la preparación de las soluciones fermentativas (dulce y salada). Esta se prepara con ingredientes de uso común que contienen gran cantidad de microorganismos fermentativos. La segunda etapa consiste en mezclar y colar las soluciones fermentativas con mantillo de bosque. El líquido resultante se agrega al lecho de compost que consiste en una mezcla de semolina y granza. Los ingredientes para preparar un compost Takakura se presentan en la Tabla 1.

En el proceso de compostaje Takakura, los microorganismos fermentativos empiezan a proliferar entre el tercer y quinto día. Durante este proceso, la solución dulce debe presentar un olor característico agridulce, lo cual indica una fermentación adecuada. En cambio, si el líquido desprende un olor desagradable o pútrido, se considera que el proceso ha fallado, posiblemente debido a la contaminación por bacterias no deseadas. Por esta razón es importante confirmar el saneamiento de los alimentos fermentados y el agua. Si el agua parece ser la causa, el agua debe hervirse y luego enfriarse para reducir la cantidad de bacterias. Por su parte, la solución salada debe oler ligeramente agria. Si huele a alcohol, entonces el proceso está completo (JICA, s.f).

Borrero (2014) describe en su trabajo que el tratamiento con Takakura tuvo un olor agradable durante su proceso, pero que al día 25, se llegó a percibir un leve olor a amoníaco que desapareció a partir del día 35. Por ello, se deben realizar inspecciones sensoriales por medio del tacto. Al apretar la matriz entre el pulgar y el dedo índice o al exprimirla en la palma de la mano, se puede obtener una estimación bastante aproximada de la humedad del compost (Martin, 2017). Durante la prueba, no se debe percibir lixiviado entre los dedos. Para garantizar un buen compostaje, es necesario mantener las condiciones medioambientales adecuadas independientemente del sistema que se emplee. Para esto, las matrices se deben airear correctamente y mantener un correcto contenido de agua (AENOR, 2006). El contenido de humedad dentro de la matriz puede ser bajo, sin embargo, si los reactores tienen exceso de humedad, empiezan a generar mal olor.

Tabla 1*Ingredientes para la preparación del sustrato Takakura (Borrero, 2014; IGES, 2010)*

Componente	Ingredientes
Lecho de fermentación:	5 kg de granza de arroz 20 kg de semolina 2 kg de mantillo de bosque
Solución fermentativa dulce (Se deja reposar durante 5 días):	15 L de agua 50 g de azúcar morena 125 g de levadura 100 g kéfir 0,5 L de agua de kéfir 3 L de leche agria 1 L de cerveza
Solución fermentativa salada (Se deja reposar durante 5 días):	4 L de agua 50 g de sal 100 g de cáscara de aguacate 200 g de cáscara de limón 100 g de cáscara de manzana 100 g de cáscara de banano 1000 g de cáscara de sandía 1500 g de cáscara de hojas de hortalizas (lechuga, apio, repollo, brócoli y remolacha)

4.5. Parámetros que definen la calidad del compost

Para que un material compostable sea considerado como recuperable orgánicamente, ningún residuo del envase o embalaje sometido a un tratamiento biológico de residuos debe generar efectos negativos sobre la calidad del compost final (AENOR, 2001). Las características del compost están determinadas por el tipo de material que se aporte, la tecnología y duración del proceso; es de buena calidad si el producto final es relativamente homogéneo, de color oscuro y olor a tierra de bosque (Campos-Rodríguez et al., 2016).

El contenido de *material seco* se determina según la *masa seca*, los *sólidos secos totales* y los *sólidos volátiles*. La *masa seca* se define como la masa de una muestra medida después del secado y se expresa en forma de un porcentaje de la masa de la muestra húmeda (AENOR, 2006). Los sólidos secos totales, corresponden a la cantidad de sólidos obtenidos tomando un volumen conocido de material de ensayo o de compost secado a ~105 °C hasta que alcanza una masa constante (AENOR, 2001; AENOR, 2006). Los sólidos volátiles representan un indicador de la cantidad de materia orgánica presente en una muestra. Su estimación se realiza restando el contenido de ceniza, es decir, el residuo obtenido tras la incineración de un volumen conocido de la muestra a ~ 550 °C, del contenido total de sólidos secos de esa misma muestra (AENOR, 2001; AENOR, 2006).

Luego, el parámetro para medir la calidad del compost resultante se define como ecotoxicidad. Este indica que la velocidad de germinación y la biomasa vegetal de especies vegetales cultivadas en las muestras de compost debería ser mayor del 90 % de la obtenida con el compost considerado como blanco o control (AENOR, 2001).

Finalmente, la calidad del compost también se define por medio de un análisis físico - químico de abonos orgánicos. Este comprende el análisis de parámetros físico - químicos en un producto sólido, como por ejemplo: la pérdidas por volatilización, porcentaje de

cenizas, el pH, la conductividad eléctrica, y la densidad aparente; obtenidos a partir de la estabilización de residuos de animales o vegetales o una mezcla de los anteriores. La información suministrada permite conocer la composición química del abono para comunicarlo en la venta, o para aplicar la enmienda con la seguridad de no generar saturación de los componentes en el momento de la fertilización (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia, s.f.).

4.6. Métodos para caracterizar la desintegración de un material de empaque

4.6.1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés)

Según Pérez García et al. (2021), la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier usa un interferómetro de Michelson para obtener el interferograma con la información espectral. Luego, este aplica la transformada de Fourier obteniendo así el espectro en el dominio de las frecuencias. Un equipo FT-IR (Figura 2) tiene una fuente que emite radiación infrarroja. Esta radiación llega a un haz de luz divisor. Una parte de la radiación se refleja y la otra pasa a través del haz de luz divisor. La radiación reflejada llega hasta un espejo fijo, donde se refleja y vuelve al haz de luz divisor, de la misma manera la radiación transmitida llega a un espejo móvil y vuelve al haz de luz divisor. Como el espejo móvil no se encuentra siempre en la misma posición, al recombinarse las mitades del haz de luz, la longitud recorrida no es la misma, originando así una interferencia, que puede ser constructiva o destructiva.

Figura 2

Equipo de FT-IR Thermo Scientific® - Nicolet iS50FT - IR del LANOTEC



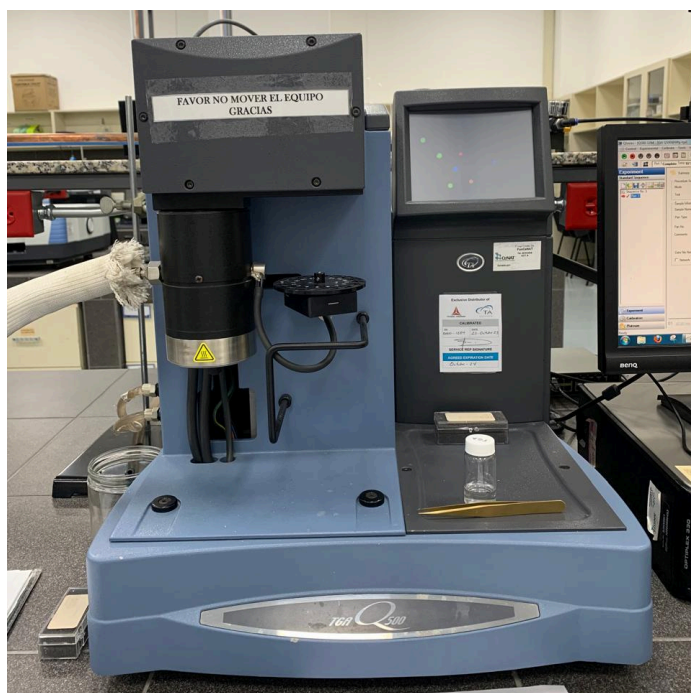
Fuente: Fotografía propia

4.6.2. Análisis termogravimétricos (TGA, por sus siglas en inglés) y calorimetría de barrido diferencial (DSC, por sus siglas en inglés)

El TGA (Figura 3) es una técnica que permite medir la variación de la masa de una muestra con respecto a cambios de temperatura o en el tiempo, en una atmósfera definida. Se usa para la caracterización de materiales en lo que respecta a su composición (Mettler Toledo, s.f.); por medio de curvas denominadas TG o termogramas y las curvas de análisis termogravimétrico diferencial (DTG, por sus siglas en inglés) (Manals et al., 2011). Por su parte, la DSC (Figura 4) es una técnica que se usa para caracterizar la estabilidad de biomoléculas en su forma nativa. Lo hace mediante la medición del cambio de calor asociado con la desnaturalización térmica de la molécula cuando se calienta a un ritmo constante (Malvern Panalytical, s.f.). Ambos equipos permiten medir incluso eventos térmicos que no provocan un cambio de masa, como la fusión (T_m), la transición vítrea (T_g) u otro tipo de transiciones de fase sólida (Mettler Toledo, s.f.).

Figura 3

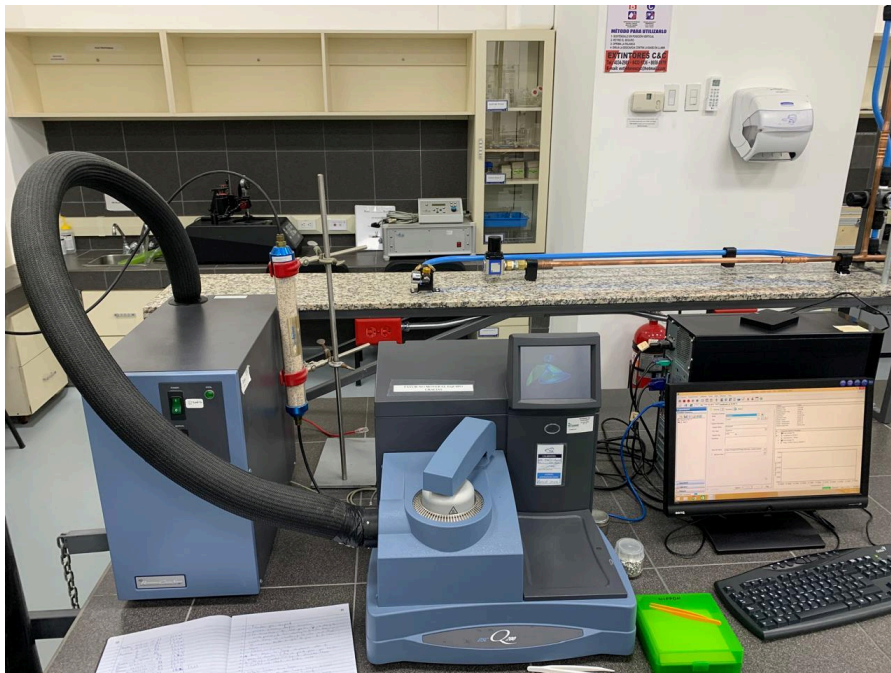
Equipo de TGA (TA Instruments® - TGA Q500) del LANOTEC



Fuente: Fotografía propia

Figura 4

Equipo de DSC (TA Instruments® - DSC Q200) del LANOTEC



Fuente: Fotografía propia

4.6.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)

Un haz de electrones se utiliza para formar una imagen. Tiene una gran profundidad de campo que permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, que significa que características espacialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas a una alta magnificación. La muestra se recubre con una capa de carbón o de un metal como el oro para darle propiedades conductoras a la muestra. Luego, es barrida con los electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones. La resolución (4 - 20 nm) depende del microscopio (Castroviejo, 2020). El equipo con el que se trabajó se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5

Equipo de (SEM JEOL - JSM 6390LV) del LANOTEC



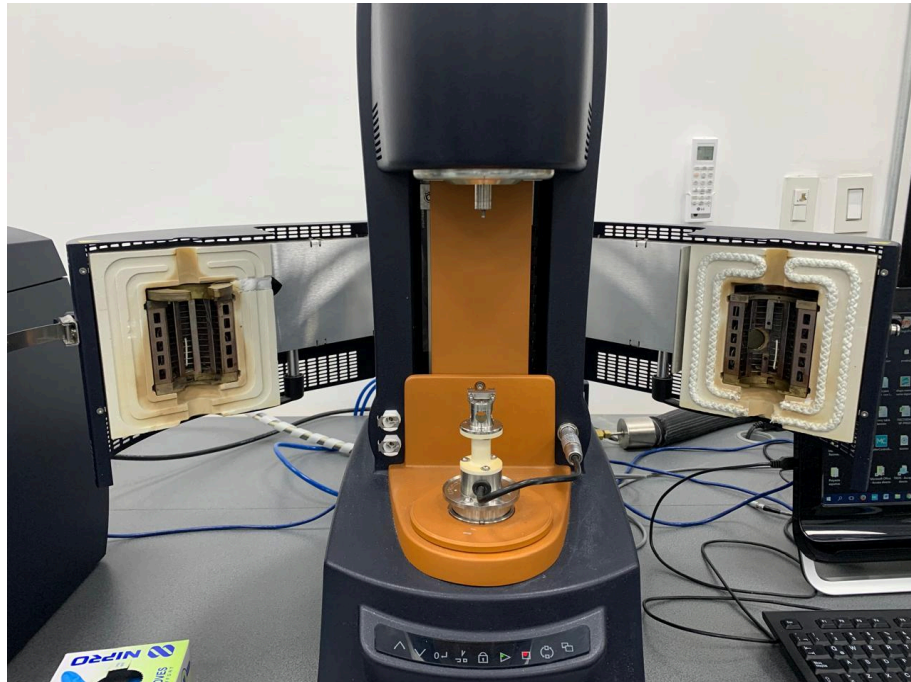
Fuente: Fotografía propia

4.6.4. Análisis Dinámico Mecánico (DMA, por sus siglas en inglés)

El DMA (Figura 6), Martínez (2006) explica que es una técnica que se emplea para la evaluación de las propiedades mecánicas, como la influencia de la estructura molecular sobre las propiedades físicas de los polímeros. Existe un gran número de factores estructurales que determinan las propiedades finales de los materiales; junto con la composición química, que determinan la naturaleza del comportamiento mecánico de los polímeros, como el peso molecular, entrecruzamiento, la cristalinidad, entre otros. Por lo tanto, los polímeros son dependientes de las propiedades intrínsecas así como también de su historial térmico. Además, existen factores externos que influyen en el comportamiento mecánico que pueden hacer que un polímero se comporte como un material vítreo, quebradizo o dúctil, como la temperatura, el tiempo, la frecuencia, el tipo de deformación, la historia térmica o el entorno ambiental.

Figura 6

Equipo de DMA (TA Instruments® - Discovery HR-3) del LANOTEC



Fuente: Fotografía propia

5. METODOLOGÍA

5.1. Descripción general

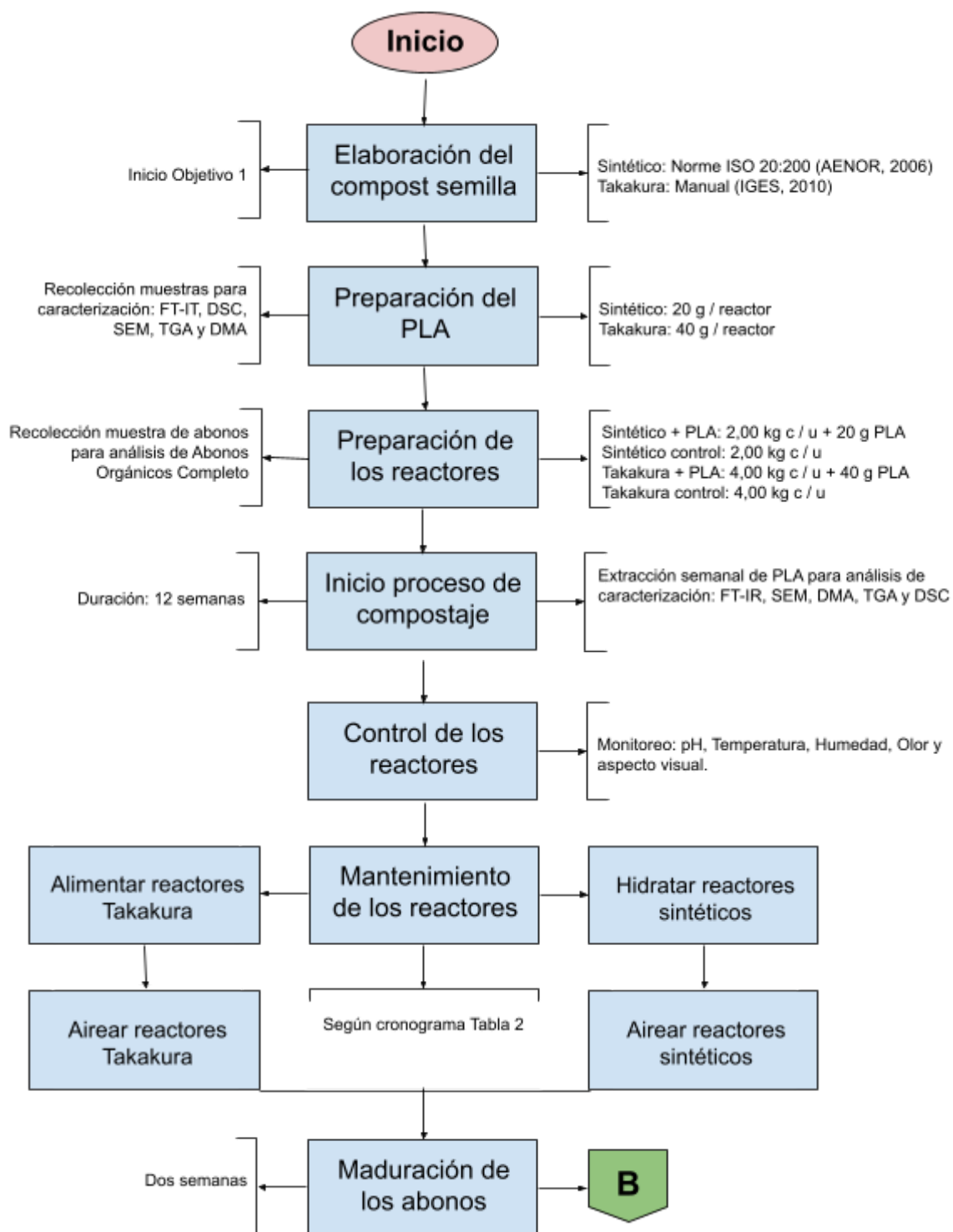
El proyecto se desarrolló en los Laboratorio de Investigaciones Varias, Poscosecha y empaque y Bioenergía de la EIB-UCR y en el LANOTEC-CeNAT, con la colaboración de la empresa *Dosmil50 empaques compostables* que proporcionó los empaques y la carrera de Ingeniería de Alimentos de la Escuela de Tecnología en Alimentos de la Sede de Liberia de la UCR. Por otra parte, la empresa *Arrocera San Pedro Lagunilla* donó las semillas de arroz para los ensayos de fitotoxicidad y la UGA los insumos para la elaboración del compost Takakura.

La Norma ISO 20200:2004 se aplicó para el desarrollo de un método cuantitativo gravimétrico. Esta norma se usó como guía para el análisis del grado de la desintegración y calidad del compost producido a partir de dos inóculos (sintético y Takakura) previamente mezclado con el polímero biodegradable PLA (40 μm) utilizado para el empaque de alimentos. Este estudio se desarrolló en condiciones controladas en un laboratorio de investigación. Adicionalmente se estudió la degradación del polímero en los sistemas de compostaje y se evaluó la degradación mediante técnicas de caracterización de: FTIR, TGA, DSC, SEM y DMA.

Además, la composición del compost resultante se definió después del proceso de degradación del polímero en estudio. Estos resultados son útiles para analizar la influencia de la degradación del polímero biodegradable utilizado como empaque para alimentos en la composición del compost sintético y Takakura. Finalmente, se evaluó la calidad del compost resultante de la biodegradación/desintegración del polímero biodegradable usado como empaque para alimentos, mediante ensayos de fitotoxicidad en casas mallas del LANOTEC según la Norma EN 13432:2000. El proceso se presenta por medio de un diagrama de flujo en la Figura 7.

Figura 7

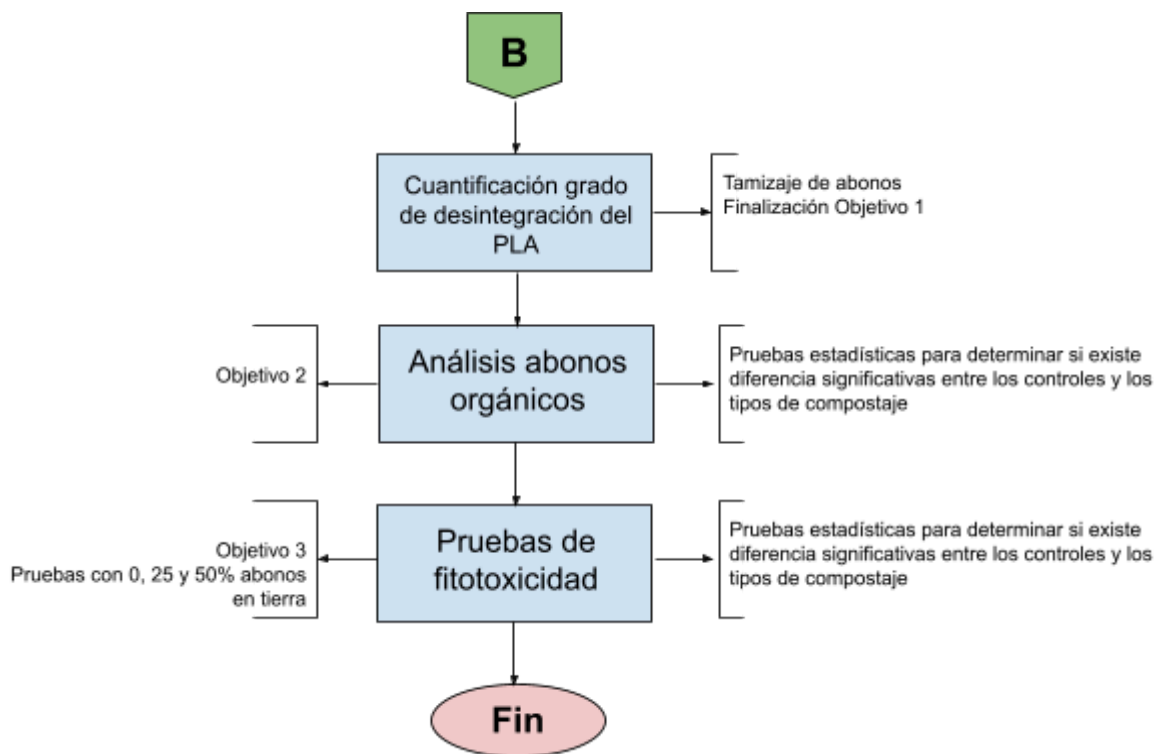
Metodología de investigación



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7

Metodología de investigación. (Continuación)



Fuente: Elaboración propia.

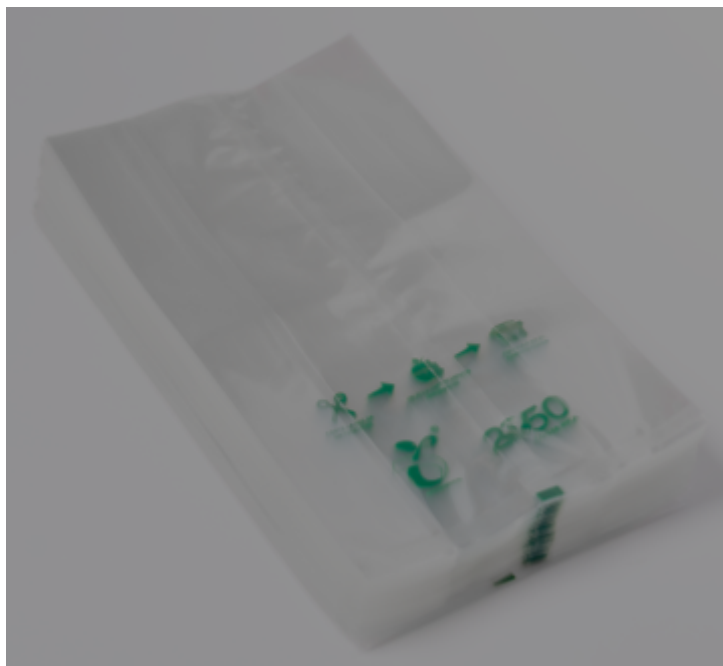
5.2. Cuantificación del grado de desintegración y el proceso de compostaje, en condiciones controladas, en inóculo sintético y Takakura

5.2.1. Preparación del material de empaque

Se utilizó un empaque usado en la industria alimentaria con dimensiones de 9,00 cm x 19 cm y 40 µm de espesor, hecho de ≥ 99,00 % PLA. Su aspecto es laminar, blanco y translúcido (Figura 8). Es insoluble en agua, tiene una gravedad específica ($H_2O = 1$) de 1,25, un punto de fusión entre 140 - 170 °C, 99,71 % masa seca y 98,52 % de sólidos volátiles.

Figura 8

Material de ensayo, empaque de PLA de 40 μm

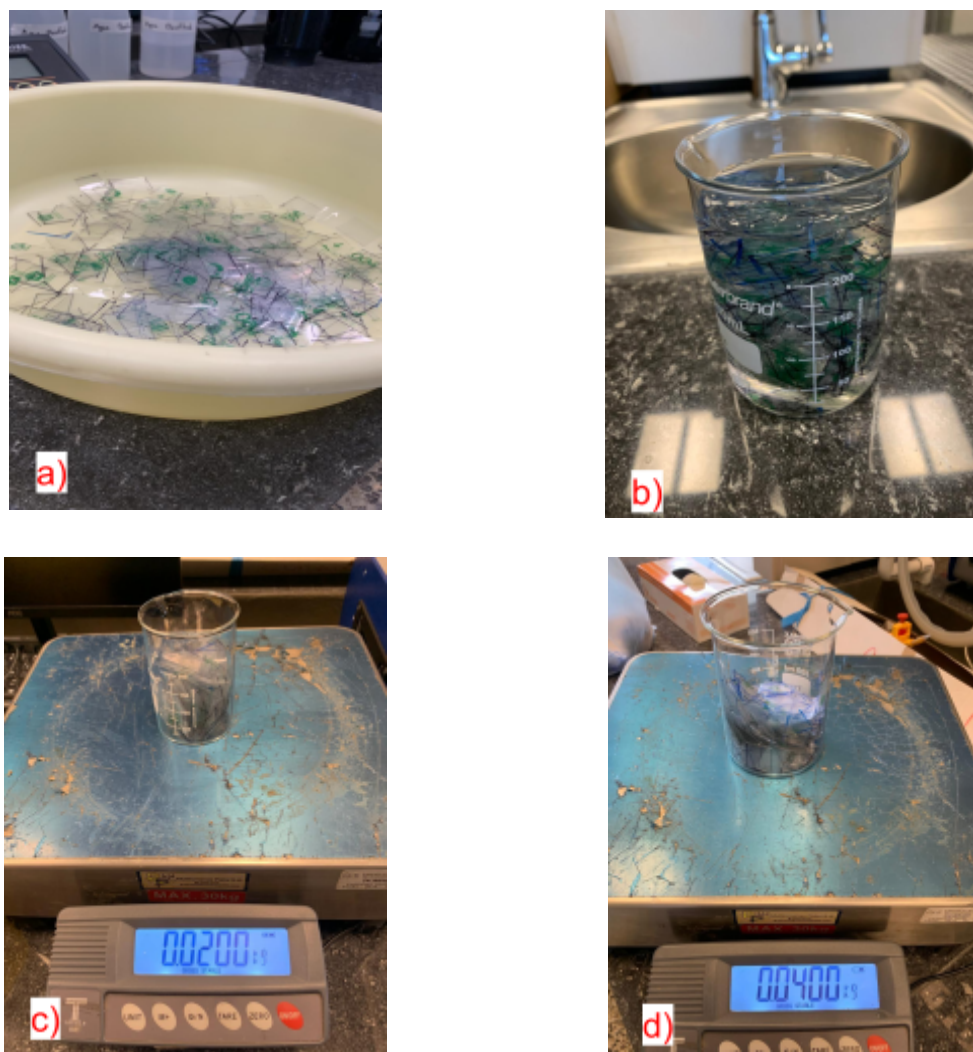


Nota. Figura ilustrativa, tomada de la tienda virtual de *Dosmil50 empaques compostables*, <https://dosmil50.com/producto/bolsas-de-pla-compostables-con-fuelle/>.

El material de ensayo (PLA de 40 μm) se cortó según su espesor. Dado que el empaque tiene un espesor menor a 5 mm, las dimensiones de los fragmentos se establecieron en 30 x 20 x 0,04 mm. Antes de mezclar los fragmentos del material de ensayo con el inóculo, estos se sumergieron en agua destilada durante un tiempo inferior o igual a 30 s (AENOR, 2006), con ayuda de un beaker, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Preparación del material de ensayo (PLA de 40 μm) para los reactores sintéticos y Takakura



Nota: a) Fragmentos de PLA con dimensiones de (30 x 20 x 0,04) mm. b) Material de ensayo humedecido en agua destilada antes de incorporarse a las matrices de compostaje. c) PLA para la matriz sintética. d) PLA para la matriz Takakura.

Fuente: Fotografías propias.

5.2.2. Preparación de los reactores de compostaje

El método especificado en la Norma ISO 20200:2004 (AENOR, 2006) se empleó para simular un proceso de compostaje aeróbico intensivo. Para llevarlo a cabo, se utilizó una matriz o sustrato sólido para el compost Takakura y otra matriz para el sintético. La matriz sintética consistió en un residuo sólido inoculado con compost maduro obtenido de una instalación industrial o municipal de compostaje. Por su parte, el compost Takakura se elaboró de manera artesanal. Las matrices sólidas de compost no tenían más de cuatro meses y se utilizaron para desintegrar los fragmentos del material de ensayo (polímero biodegradable) (AENOR, 2006).

El proceso sintético se realizó en un reactor de compostaje que consiste en una caja de polipropileno (PP) de (37 x 25 x 7,7) cm (largo, ancho, alto). Esta puede apreciarse en la Figura 10. La caja se cubrió con una tapa que asegure la hermeticidad para evitar una

evaporación excesiva. Además, se realizó un orificio de 5 mm de diámetro para facilitar el intercambio de gases entre la atmósfera interior y la exterior. Este se ubicó a 3,5 cm del fondo de la caja en el centro de ambos lados de 25 cm de largo de la caja y siempre se tuvo el cuidado de que no se bloqueara (AENOR, 2006).

Figura 10

Caja de polipropileno para los reactores con compost sintético



Nota. Figura ilustrativa, tomada de la tienda virtual de *Ferretería EPA Costa Rica*, <https://cr.epaenlinea.com/caja-larga-plana-con-cierre-clip.html>.

Por su parte, los reactores con el compost Takakura consisten en una bolsa de tela negra de geotextil. Esta facilitó el intercambio gaseoso del biosistema del compostaje aerobio con el exterior y mantuvo estable la temperatura interna del reactor, sin permitir el ingreso de plagas. Cada bolsa, se almacenó en una caja semicalada de plástico de (27 x 49,5 x 32) cm (largo, ancho, alto), que se muestra en la Figura 11; y se cubre con una tapa de tela negra de geotextil para proteger del ambiente externo.

Figura 11

Caja semicalada de plástico para los reactores con el compost Takakura



Nota. Figura ilustrativa, tomada de la tienda virtual de *Ferretería EPA Costa Rica*, <https://cr.epaenlinea.com/caja-semi-calada.html>.

Se tuvo un control del gramaje en la formulación de los ingredientes de ambos compost, así como en las masas de las matrices finales y la cantidad de PLA de 40 μm que se incorporó dentro de los reactores. Para ello, se empleó una balanza de precisión marca *T-Scale* y *modelo PRW*, del laboratorio de Investigaciones Varias de la EIB - UCR, que se aprecia en la Figura 12.

Figura 12

Balanza de precision T - Scale PRW del laboratorio de Investigaciones Varias de la EIB - UCR



Fuente: Fotografía propia.

5.2.3 Preparación del compost sintético

Para la elaboración del inóculo sintético, se trabajó bajo la metodología de Torrez (2023) y Segura (2023), que se basaron en la Norma ISO 20200:2004 (AENOR, 2006), la cual menciona que el residuo sintético debe estar compuesto de:

- 40 % de aserrín de madera no tratada.
- 30 % de alimento para conejos: debe ser un producto comercial a base de alfalfa y harina vegetal con un contenido de proteína de ~15 % y de celulosa de ~20 %.
- 10 % de compost maduro.
- 10 % de almidón de maíz.
- 5 % de sacarosa.
- 4 % aceite de maíz.
- 1 % de urea.

La composición del inóculo debe basarse en la masa seca total de residuo sólido considerada como 100 % y se estableció una tolerancia de 5 % en las mediciones de la masa de los componentes del residuo sintético, incluido el agua. Los materiales para elaborar el compostaje sintético se adquirieron de distintos lugares. Se empleó agua destilada para ajustar el contenido final de agua total (55 %). El aserrín de madera no tratada fue proporcionado por el Taller de Ebanistería de la UCR. El abono orgánico (*Ever Green*) se adquirió comercialmente. La Urea (*Seracsa*, 46 %) se adquirió como fertilizante granulado. El almidón de maíz se adquirió como fécula de maíz (*Maizena*). La sacarosa se adquirió comercialmente como azúcar (*Doña María*), así como el aceite de maíz (*Mazola*). Estos últimos tres ingredientes provienen de puntos de venta localizados en el Valle Central.

Por último, el alimento para conejo (*Kaytee*) se compró en una veterinaria local, ubicada en San Pedro, San José, este contiene 15 % de proteína cruda, 17 % celulosa y la base es harina de alfalfa.

Para precisar la cantidad de cada componente del compost sintético, se determinó el contenido de humedad en base húmeda (CH) y masa seca (MS) del aserrín, compost maduro, urea y alimento de conejo; con base en las ecuaciones [1] y [2], respectivamente. Cabe aclarar que el almidón de maíz y la sacarosa se consideran como componentes 100 % secos. Ejemplos de dichos cálculos se pueden apreciar en el Apéndice 1.

$$\% CH = 100 \times \frac{M_H - M_S}{M_H} \quad [1]$$

$$\% MS = 100 \times \frac{M_S}{M_H} \quad [2]$$

Donde:

- % CH: contenido de humedad presente en cada componente antes del proceso de compostaje (%).
- % MS: masa seca presente en cada componente antes del proceso de compostaje (%).
- M_H : masa húmeda de cada componente antes del proceso de secado (g).
- M_S : masa seca de cada componente (g).

Para estimar la masa seca de cada material, se colocó cada muestra en recipientes de aluminio de $37,74 \pm 0,308$ g, buscando cubrir el fondo del mismo con el material de ensayo. Además, se registró la masa inicial con una balanza de precisión (*OHAUS* modelo *L179*) con una resolución de $\pm 0,001$ g; y se colocaron en un horno de convección forzada (*JEIO TECH* modelo *OF - 22 GW*) a 105°C durante 24 h. Posteriormente, las muestras se estabilizaron a temperatura ambiente, dentro de un desecador y se registraron las masas. Se realizaron tres repeticiones de cada material. Los equipos se pueden observar en la Figura 13.

Figura 13

Equipos para determinar la masa seca de cada componente del compost sintético



Nota: a) Balanza de precisión. b) Incubadora. c) Desecador con muestras estabilizadas.

Fuente: Fotografías propias.

Una vez establecida la masa seca de cada componente, se siguieron las proporciones sugeridas por la Norma ISO 20200:2004 y se realizó la mezcla para la fabricación del compost sintético. Para ello, se contempló que la norma indica que la masa seca del inóculo sintético debe ser 45 %, para que el restante (55 %) sea agua destilada.

Al momento de establecer la receta, se decidió fabricar 20,00 kg de inóculo sintético. Se trabajó con ocho reactores en total, de estos cuatro contienen una mezcla de compost con el polímero y cuatro solamente compost que se usaron como controles. Cada reactor contenía ~2,00 kg de compost. Además, se contemplaron 4,00 kg adicionales para realizar los análisis de abonos orgánicos y un excedente en caso de un imprevisto. Por lo tanto, de los 20,00 kg de matriz sintética, 9,00 kg corresponden a la masa seca (45 %). Esta última estaba conformada por 40 % de aserrín, 30 % de alimento para conejos, 10 % de compost maduro, 10 % de almidón de maíz, 5 % de sacarosa, 4 % de aceite de maíz y 1 % de urea. De esta manera, se obtiene el gramaje para cada componente implementando la ecuación [3]:

$$MS\ componente = Masa\ matriz \times \% MS\ matriz \times \% Componente \quad [3]$$

Una vez establecido el gramaje de cada componente con base a la MS, se trabajó con el contenido de humedad (% CH) para establecer cuánta masa (Masa húmeda, MH) se debe agregar para elaborar 20,00 kg de compost sintético. Para ello, se utilizó la ecuación [4]:

$$MH\ componente = MS\ componente + (MS\ componente \times \% CH) \quad [4]$$

Los valores obtenidos a partir de las ecuaciones [3] y [4] corresponden a los valores teóricos de masa de cada componente que se deben agregar al compost sintético. Para comprobar que los valores reales de cada componente agregados al compost cumplan con una diferencia < 5 %, se aplica la ecuación [5]. Ejemplos de estos cálculos, se pueden apreciar en el Apéndice 1. Esta operación se realizó justo antes del inicio del ensayo. La relación carbono:nitrógeno (C/N) debe estar comprendida entre 20:1 y 40:1, para obtener este valor se realizó un análisis de abonos orgánicos en el CIA de la UCR (AENOR, 2006; Torrez, 2023; Segura 2023).

$$Tolerancia\ componente\ (\%) = \left| \frac{MH\ real - MH\ teórica}{MH\ real} \right| \times 100 \quad [5]$$

Establecida la cantidad de cada componente, se procedió a realizar la mezcla sobre un plástico de color negro en el patio trasero del laboratorio de poscosecha y empaque. Para ello, fue necesario contar con una cubeta plástica. La mezcla se realizó manualmente para poder percibir el contenido de humedad de la matriz, pues esta debía estar húmeda y homogénea, sin generar lixiviados al momento de realizar la prueba del puño. Dicho proceso se puede apreciar en la Figura 14.

Figura 14

Elaboración de la matriz de compost sintético



a) Materiales para elaboración de compost sintético.



b) Elaboración de compost sintético.



c) Prueba de humedad de compost sintético (prueba del puño).

Fuente: Fotografías propias.

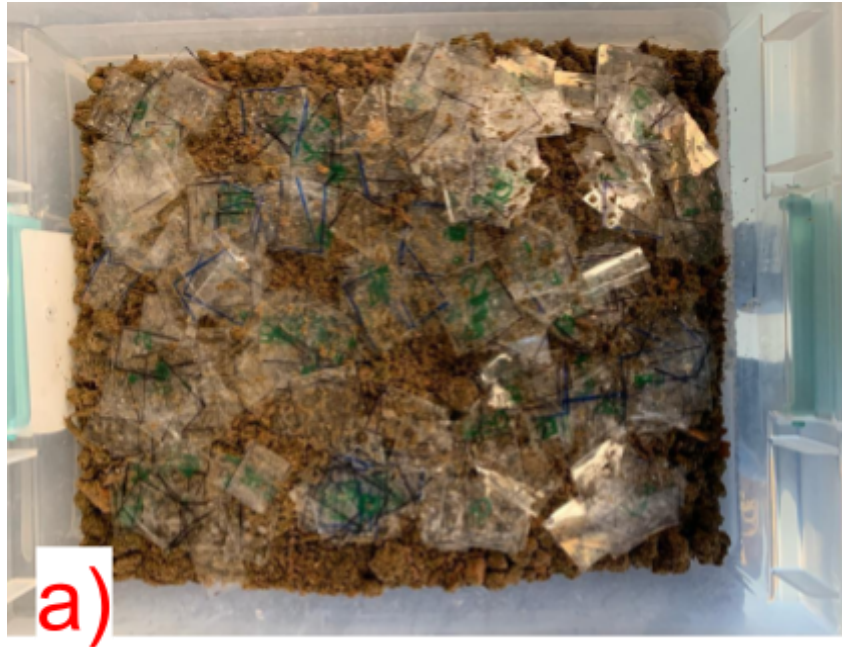
Se realizó la mezcla de las matrices con los polímeros con el cuidado de no generar daño mecánico al material de ensayo. En los reactores sintéticos se colocaron $2,00 \text{ kg} \pm 9,97 \text{ g}$ de residuo sintético húmedo y en cuatro de ellos se agregaron $20,00 \text{ g}$ del biopolímero en estudio (Figura 15). Los otros cuatro reactores se definieron como controles. Los reactores se cerraron herméticamente, se ingresaron en la incubadora *Memmert HPP400* (Figura 16) a $58 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 12 semanas y se colocaron sensores (*HOB0*) para monitorear la temperatura y la humedad durante el compostaje. Finalmente, se resguardaron por dos semanas más, en condiciones mesofílicas (temperatura ambiente). Cabe mencionar que cada reactor fue hidratado según se indica en la tabla 2.

Una vez finalizada la preparación del inóculo sintético, se debe introducir el sustrato en el fondo del reactor, formando una capa homogénea. La mezcla no se comprime, permitiendo así el intercambio de gases. Los inóculos deben ser de una composición constante y estar desprovistos de cualquier material plástico no deseado que se pudiera identificar por error como material de ensayo al final, modificando la evaluación final (AENOR, 2006). Cabe mencionar que se llevó un registro de la masa del material de ensayo en cada reactor.

Figura 15

Preparación de los reactores con la matriz sintética

a) Reactores con compost sintético y PLA de 40 μ m



b) Reactores sintéticos control



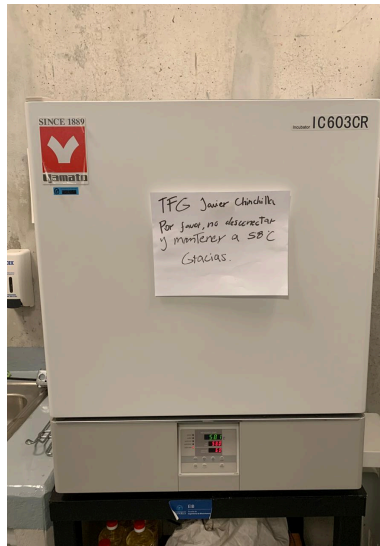
Fuente: Fotografías propias.

Figura 16

Incubadoras del laboratorio de Bioenergía usadas para el compostaje sintético



(a) Incubadora Memmert - HPP410eco



(b) Incubadora Yamato - IC603CR



(c) Reactores con compost sintético dentro de la incubadora a $58 \pm 2^\circ\text{C}$

Fuente: Fotografía propia.

Tabla 2

Procedimiento del compostaje sintético y Takakura (AENOR, 2006; Japan International Cooperation Agency [JICA], s.f.)

Duración desde el comienzo del ensayo (días)	Operación	
	Sintético	Takakura
0, 1	- Preparación de materiales así como de los reactores para el compostaje.	- Preparación de materiales así como de los reactores para el compostaje.
2		- Preparación de soluciones fermentativas dulces y saladas.
3, 4		- Control sensorial de las soluciones fermentativas.
7	- Inicio del proceso de compostaje para todos los tratamientos. - Registro de la masa inicial en cada reactor. Se mide pH, temperatura.	- Inicio del proceso de compostaje para todos los tratamientos. - Registro de la masa inicial en cada reactor. Se mide pH, temperatura.
8, 9, 10, 11, 14, 16, 18, 21	- Se pesa el reactor y se echa agua en caso de ser necesario, para restituir la masa inicial. - Se mide la temperatura para todos los reactores. - Se mezcla la materia de compostaje para todos los reactores.	- Se alimentan los reactores. - Se mide la temperatura para todos los reactores. - Se mezcla la materia de compostaje para todos los reactores.
15, 17, 23, 25, 28, 30, 32, 35	- Se pesa el reactor y se echa agua en caso de ser necesario, para restituir la masa inicial. - Se mide la temperatura para todos los reactores.	- Se alimentan y se mezclan los reactores. - Se mide la temperatura para todos los reactores.

Tabla 2

*Procedimiento del compostaje sintético y Takakura (AENOR, 2006; JICA, s.f.).
(Continuación)*

Duración desde el comienzo del ensayo (días)	Operación	
	Sintético	Takakura
37, 52	- Se pesa el reactor y se echa agua en caso de ser necesario, para restituir la masa inicial al 80 %. - Se mide la temperatura para todos los reactores. - Se mezcla la materia de compostaje para todos los reactores.	- Se alimentan y se mezclan los reactores. - Se mide la temperatura para todos los reactores.
Entre 37 y 67, dos veces por semana	- Se pesa el reactor y se echa agua en caso de ser necesario, para restituir la masa inicial al 80 %. - Se mide la temperatura para todos los reactores. - No se mezclan las matrices del compostaje.	- Se alimentan y se mezclan los reactores. - Se mide la temperatura para todos los reactores.
Del 67 al 97	- Se pesa el reactor y se echa agua en caso de ser necesario, para restituir la masa inicial al 70 %. - Se mide la temperatura para todos los reactores. - No se mezclan las matrices del compostaje.	- Se alimentan y se mezclan los reactores. - Se mide la temperatura para todos los reactores.
97 al 112	- Se deja madurar todos los reactores a temperatura ambiente. - No se mezclan las matrices del compostaje.	- Se deja madurar todos los reactores a temperatura ambiente. - No se alimentan los compostajes pero si se mezclan.
112	- Se pesan los reactores. - Se mide el pH y la temperatura para los reactores.	- Se pesan los reactores. - Se mide el pH y la temperatura para los reactores.

5.2.4 Preparación del compost Takakura

La elaboración del inóculo artesanal, se realizó con el apoyo de una capacitación a cargo de la UGA-UCR. Esta unidad donó los insumos del compost semilla y las soluciones fermentativas dulces para el refuerzo microbiológico (Figura 17). Una vez realizado el refuerzo (Figura 18), la mezcla se dejó reposar durante ocho días. Lo anterior para asegurar que todos los reactores artesanales inicien con la misma población microbiana y que estos no se encuentren en estado de latencia; así los procesos de biodegradación de la materia orgánica que se adiciona periódicamente al compost no se demoran.

Figura 17

Materia prima para el compostaje Takakura, proporcionada por la UGA de la UCR

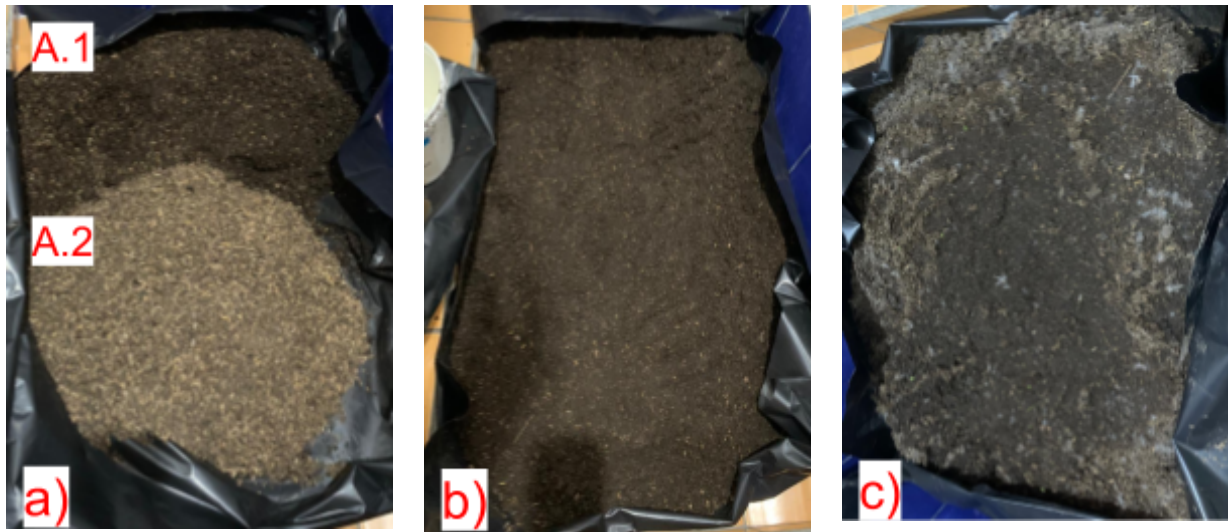


Nota: a) Saco de compost semilla Takakura; b) Compost semilla Takakura.

Fuente: Fotografías propias.

Figura 18

Refuerzo del compost artesanal tipo Takakura



Nota: a). A.1) Compost semilla sin refuerzo de microorganismos con fermento dulce; A.2) Compost semilla reforzado con microorganismos del fermento dulce. b) Compost semilla reforzado con microorganismos del fermento dulce y homogenizado. c) Compost semilla Takakura reforzado.

Fuente: Fotografías propias.

Se prepararon ocho reactores artesanales con compost Takakura alimentados con residuos orgánicos para obtener reactores de $4,00 \text{ kg} \pm 0,772 \text{ g}$. Estos reactores se ubicaron en el patio trasero del laboratorio de poscosecha y empaque como se puede apreciar en la Figura 19. La mezcla del inóculo artesanal con los residuos orgánicos y la preparación de los reactores, se hizo empleando una pala y un plástico negro como se aprecia en la misma figura.

Figura 19

Preparación del compost artesanal tipo Takakura



Nota: a) Mezcla del compost reforzado con residuos orgánicos. b) Residuos orgánicos proporcionados por *La Casita de las Sopas (San Pedro, Montes de Oca)*. c) Reactores Takakura en el patio trasero del laboratorio de poscosecha y empaque.

Fuente: Fotografías propias.

Los residuos orgánicos, se obtuvieron por medio de un acuerdo con un restaurante ubicado en San Pedro, San José, Costa Rica, llamado *La Casita de las Sopas*. Estos residuos, proceden de los desechos generados en la cocina del restaurante, resultantes de la elaboración de sus platillos. En su mayoría, estos residuos estaban compuestos de arroz, mariscos, carne de res, pollo, arroz y cáscaras de zanahoria, yuca, papa, ayote, entre otros.

Los reactores Takakura iniciaron con $4,00 \text{ kg} \pm 0,772 \text{ g}$ de residuo artesanal y en cuatro de ellos se agregó $40,00 \text{ g}$ de PLA, como se muestra en la Figura 20. De esta forma, en cada matriz se mantuvo una relación de la masa del material de ensayo y la masa del inóculo húmedo en $\sim 1,00 \%$, cumpliendo con lo establecido por la norma AENOR (2006) de una relación entre $0,5$ y $2,00 \%$. Se les colocó la funda de geotextil, se colocaron sensores de temperatura con termopares tipo K y se dejaron en el espacio asignado para este fin, bajo techo para protegerlos de las lluvias (Figura 19.c).

Figura 20

Preparación de los reactores con la matriz Takakura



Nota: a) Reactores con compost Takakura y PLA de $40 \mu\text{m}$. b) Reactores Takakura control.

Fuente: Fotografías propias.

El compostaje Takakura tuvo una duración de 12 semanas a temperatura ambiente. Cada reactor con Takakura se aireó y alimentó con residuos orgánicos domésticos diariamente o cada vez que la matriz lo requirió sin sobrecargar de materia húmeda los reactores. Adicionalmente, se dejaron reposar por dos semanas, sin alimentación, para la maduración (JICA, s.f.). Se llevó un registro de la masa del material de ensayo en cada reactor y se siguieron las indicaciones del cronograma de mediciones descrito en la norma y la Tabla 2 (AENOR, 2006; JICA, s.f.; Torrez, 2023) para garantizar un buen compostaje y las condiciones medioambientales adecuadas.

5.2.5. Control del proceso de compostaje

El control del proceso de compostaje se realizó mediante la inspección del olor y el aspecto visual. Además, se monitoreó el crecimiento de microorganismos; y la variación de la temperatura, la humedad y el pH de los reactores. Se realizaron inspecciones sensoriales por medio del tacto. Se aplicó el método de Martin (2017), el cual consistió en apretar la matriz entre el pulgar y el dedo índice o exprimirla en la palma de la mano. Esta metodología permite obtener una estimación bastante aproximada de la humedad del compost. Durante la prueba, no se debe percibir lixiviado entre los dedos.

Se contó con un pHmetro marca *Hanna* modelo *HI 2211 pH/ORP meter*. Para su medición se calibró el instrumento con buffers de pH 4, 7 y 10. Además, se utilizó agua destilada con un pH de $5,27 \pm 0,1200$ a $22,80 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual cumple con las condiciones de acidez en agua destilada estipuladas por la norma mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016, que establece que debe estar con valores entre 5,0 y 8,0 de pH para considerarse destilada o desionizada (Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad [SINEC], 2016).

Para el monitoreo del pH de los reactores sintéticos, primero se recolectaron muestras y se hidrataron con agua destilada, para luego ser agitadas en una Incubadora con agitación orbital digital marca *Thermo Scientific* modelo *MaxQ 4450* (Figura 21). Después se dejó reposar las muestras por 30 min y finalmente se hicieron las mediciones de pH.

Figura 21

Incubadora con agitación orbital digital Thermo Scientific modelo MaxQ 4450



Fuente: Fotografía propia.

El proceso de aireación en el compost sintético se llevó a cabo con una espátula de laboratorio. Esta operación se realizó teniendo el cuidado de no dañar los fragmentos de PLA mezclados con el compost para evitar cualquier degradación mecánica de los fragmentos del material de ensayo (AENOR, 2006). Para el monitoreo de la temperatura, se contó con termómetros incorporados dentro de las incubadoras que registraron la temperatura de trabajo. Además, se añadieron dos sensores de temperatura y humedad relativa (*HOBO*) para medir la temperatura de los reactores dentro de las incubadoras. Para cuantificar y monitorear el proceso de compostaje se realizaron mediciones de humedad (con el método gravimétrico) y temperatura (termómetro) del compost a lo largo del proceso.

Los reactores Takakura fueron monitoreados por medio de dos sensores de temperatura (*HOBO*) de cuatro canales con termopares tipo K. Se airearon por medio de una pala jardinera de día de por medio o cada vez que se alimentaban los reactores. Ambos sensores se pueden apreciar en la Figura 22.

Figura 22

Sensores de temperatura usados para el monitoreo del proceso de compostaje



(a) Sensor reactores sintéticos

(b) Sensor reactores Takakura

Fuente: Fotografías propias.

5.2.6. Determinación de la masa seca y de los sólidos volátiles del compost sintético

La norma ISO 20200:2004 (AENOR, 2006) establece que después del tamizado, se debe determinar la masa seca y el contenido de sólidos volátiles de los compost iniciales y resultantes. La masa seca (MS) de la muestra se determinó por secado en una estufa (*JEIO TECH, OF - 22 GW*) a 105 °C hasta masa constante (Figura 13.b). La masa seca se expresa como porcentaje de la masa total de la muestra.

El contenido en sólidos volátiles se determinó por calcinación a 550 °C durante 6 h, de la muestra previamente secada a 105 °C para determinar la masa seca, en un horno mufla (*Cole Parmer / Lindberg / Blue M, Box Furnace*) (Figura 23). La pérdida de masa durante la calcinación corresponde al contenido de sólidos volátiles de la muestra. El contenido de sólidos volátiles (SV) se expresa como porcentaje de la MS de la muestra. El control gravimétrico se hizo empleando una balanza de precisión (*OHAUS, L179*, Figura 13.a).

Figura 23

Horno mufla del laboratorio de Investigaciones Varias



Fuente: Fotografías propias.

5.2.7. Medición del grado de desintegración del PLA

La norma ISO 20200:2004 (AENOR, 2006) menciona que el compost resultante de cada reactor se tamiza separadamente, comenzando con un tamiz de 10 mm y se examina la fracción que no pasa a través de este tamiz. Todo aglomerado de compost existente se rompió con suavidad para no deteriorar ningún fragmento residual del material de ensayo que pudiera estar atrapado en él. Todo material que no pasó el tamiz se reunió y almacenó. Posteriormente, el compost que pasó por el tamiz de 10 mm, se pasó por uno de 5 mm y luego por uno de 2 mm, repitiendo el procedimiento utilizado para el tamiz inicial.

El material de ensayo recogido de las diversas fases del tamizado se reagrupó, se limpió de compost con la precaución de no perder ningún pedazo de material de ensayo. Finalmente, el PLA se secó en un horno a 40 ± 2 °C al vacío hasta masa constante. Se registró la masa final (AENOR, 2006). Para el secado, se empleó la balanza de precisión y el horno de convección forzada con el que se determinó la MS (Figura 13). Este procedimiento se realizó tanto para las matrices sintéticas como Takakuras.

5.2.8. Cuantificación del grado de desintegración del PLA

Al finalizar el proceso de tamizado, se consideró material no desintegrado todo aquel que no pasó a través de los tamices. El material que sí pasó, se considera material desintegrado, así como la reducción en la masa de la muestra de ensayo; y se utilizó para calcular el grado de desintegración (%) según la ecuación [6] (AENOR, 2006). Donde: m_i es la masa seca inicial del material de ensayo; m_r es la masa seca del material de ensayo residual recuperado del tamizado (AENOR, 2006; Torrez, 2023). Este procedimiento se realizó tanto para las matrices sintéticas como Takakuras; y se calculó para cada reactor.

$$D = \frac{m_i - m_r}{m_i} \times 100 \quad [6]$$

5.2.9. Disminución del contenido de los sólidos volátiles

En cada reactor, la disminución R del contenido total en sólidos volátiles entre los inóculos (sintéticos y artesanales) iniciales y el compost resultante a final del proceso se calcula con la ecuación [7] (AENOR, 2006):

$$R = \frac{[m_{ir} \times (DM)_{ir} \times (VS)_{ir}] - [m_{fr} \times (DM)_{fr} \times (VS)_{fr}]}{[m_{ir} \times (DM)_{ir} \times (VS)_{ir}]} \times 100 \quad [7]$$

Donde:

- m_{ir} : la masa inicial del residuo sintético o Takakura húmedo introducido en el reactor.
- $(DM)_{ir}$: la masa seca inicial del residuo sintético o Takakura, expresada en porcentaje, dividida por 100.
- $(VS)_{ir}$: el contenido inicial en sólidos volátiles del residuo sintético o Takakura, expresada en porcentaje, dividido por 100.
- m_{fr} : la masa final del compost.
- $(DM)_{fr}$: la masa seca final del compost, expresada en porcentaje, dividida por 100.
- $(VS)_{fr}$: el contenido final de sólidos volátiles del compost, expresada en porcentaje, dividido por 100.

5.2.10. Caracterización del PLA durante el proceso de compostaje

Se realizaron los análisis de FT-IR, TGA, DSC, DMA y SEM para estudiar los cambios en la estructura polimérica y morfológica del polímero analizado (PLA de 40 μ m). Se realizaron análisis semanales según el grado de desintegración del PLA y si su estructura y tamaño lo permitían. La primera medición se efectuó antes del compostaje, tomando estos resultados como punto de referencia y para verificar que el único material que constituye el empaque corresponde a PLA 100 % puro de 40 μ m de espesor. Las mediciones restantes se realizaron cada semana hasta completar las 12 semanas del proceso de compostaje.

5.2.10.1. Calorimetría de barrido diferencial (DSC)

Primero se realizó un encapsulado hermético de $5,15 \pm 0,0600$ mg de PLA de 40 μ m en unas cápsulas de aluminio con una base y tapa de $42,30 \pm 0,200$ mg y $13,77 \pm 2,08$ mg, respectivamente (Figura 24). Seguido, las muestras se colocaron en un calorímetro (TA Instruments®, DSC Q200, Figura 4) ubicado en el LANOTEC. Se suministró 10 ml/min de N_2 como gas de purga para crear una atmósfera inerte y evitar reacciones no deseadas, como la oxidación. Finalmente, se programó el Software (TA Instrument Explorer 2,0) del equipo para llevar la cápsula a una temperatura de equilibrio de 25 °C, mantener un ambiente isotérmico por 1 min e iniciar una rampa térmica de 10 °C/min hasta los 200 °C. Las pruebas se realizaron por triplicado.

Figura 24

Cápsulas de aluminio para resguardo de muestras en el equipo de DSC



Nota: la fotografía fue tomada sobre una hoja milimétrica.

Fuente: Fotografías propias.

5.2.10.2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Las muestras se colocaron en un equipo marca *Thermo Scientific®*, modelo *Nicolet iS50 FT - IR* (Figura 2), del LANOTEC con un atenuador de reflectancia (Murillo-Vargas et al., 2020). Se realizó un barrido en un intervalo de onda de 500 cm^{-1} a 4.000 cm^{-1} . Este rango corresponde al infrarrojo medio, región de absorción de la mayor parte de los compuestos orgánicos (Armelin-Diggroc et al. (2020). Los análisis se realizaron por triplicado.

5.2.10.3. Análisis termogravimétrico (TGA)

Para este análisis se colocaron las muestras de $564,10 \pm 15,60\text{ mg}$ de PLA de $40\text{ }\mu\text{m}$ en una balanza de platino, dentro del equipo de TGA (*TA Instruments®, TGA 500*, Figura 3) y se suministró entre 10 ml/min de N_2 como gas de purga para crear una atmósfera inerte y evitar reacciones no deseadas. Se programó el equipo para llevar la muestra a una temperatura de equilibrio de $45\text{ }^\circ\text{C}$. El ambiente se mantuvo isotérmico por 1 min y se inició una rampa térmica de $10\text{ }^\circ\text{C/min}$ hasta los $500\text{ }^\circ\text{C}$. Las pruebas se realizaron por triplicado.

5.2.10.4. Análisis Mecánico Dinámico (DMA)

Las muestras se colocaron en el reómetro (*TA Instruments, Discovery HR-3*, Figura 6), del LANOTEC. Se aplicó una prueba de tensión para una geometría rectangular con una velocidad de $1.000\text{ }\mu\text{m/s}$. Cabe mencionar que el tamaño de muestra para la caracterización fue de $20,80 \pm 0,34\text{ mm}$ de largo, $5,20 \pm 0,61\text{ mm}$ de ancho y $0,04 \pm 0,00\text{ mm}$ de espesor. Se hicieron cuatro repeticiones de este análisis.

5.2.10.5. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las muestras fueron montadas sobre bases de aluminio utilizando cinta de carbón de doble cara con una fase intermedia de aluminio. Posteriormente, fueron metalizadas con una fina capa de oro mediante pulverización catódica (sputtering), aplicando una corriente de 20 mA durante 3 minutos , con el objetivo de mejorar su conductividad eléctrica.

Una vez preparadas, las muestras fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando el equipo *JEOL JSM-6390LV* (Figura 5), operando a un voltaje de aceleración de 10 y 15 kV , con detección de electrones secundarios (SEI). Se adquirieron micrografías de las caras frontal y lateral del empaque con aumentos de $\times 5.000$, $\times 1.500$, $\times 1.000$, $\times 500$, $\times 250$ y $\times 50$.

5.3. Evaluación de la influencia de la degradación de PLA en la composición de dos tipos de compost (sintético y Takakura) mediante un análisis de abonos orgánicos en condiciones de laboratorio

Se hizo un análisis físico - químico de las muestras de las matrices de compost al inicio y al final del proceso de compostaje, una vez tamizadas. Tomando como referencia a Torrez (2023), Segura (2023) y la Norma UNE-EN ISO 20200:2004 (AENOR, 2006), las muestras de residuos utilizadas al inicio de la prueba y las muestras de compost obtenidas al final del proceso de compostaje, se analizaron químicamente, mediante análisis de abonos orgánicos en el CIA - UCR. Con el objetivo de determinar la composición del compost resultante posterior a las 12 semanas, que especifica la Norma, se determinaron los valores iniciales y finales de los siguientes parámetros: carbono (C), nitrógeno (N), carbono total / nitrógeno total (C / N relación), potencial de hidrógeno (pH), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), azufre (S), contenido de humedad (% CH) y conductividad eléctrica (CE). Además, se incluyeron los parámetros de peso por unidad de volumen (densidad), sólidos secos totales y sólidos volátiles para definir la calidad del compost resultante.

En estos ensayos se incluyó también el análisis de la muestra control del compost. Esta consiste en el producto obtenido de los residuos sólidos tanto del compost sintético como del Takakura libres del polímero, al final del proceso de compostaje. Se aplicó un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis y una prueba de comparación múltiple de Dunn con la corrección de Bonferroni, con un nivel de significancia de $\alpha = 5 \%$. El software *Microsoft Excel 2013* se usó para establecer si existen diferencias significativas entre cada tratamiento y el control.

5.4. Ensayos de fitotoxicidad

Tomando como referencia a Torrez (2023), Segura (2023) y a la Norma UNE-EN ISO 20200:2004 (AENOR, 2006), el análisis de la influencia de la degradación de polímeros biodegradables en la calidad del compost se hizo mediante pruebas de fitotoxicidad, según la Norma EN 13432:2000 (AENOR, 2001). Este análisis se realizó mediante la evaluación de los posibles efectos ecotóxicos en dos tipos de plantas, bajo condiciones controladas durante 21 días.

El análisis incluyó la comparación del compost producido con y sin la adición del PLA. El ensayo de crecimiento de plantas siguió lo indicado en el documento de la OECD Guideline for testing of chemical 208 "Terrestrial plants. Growth Test" (OECD 208) (OECD, 2006). Para realizar las pruebas se mezcló un sustrato de referencia con el compost por analizar. El sustrato de referencia consistió en tierra comercial para macetas, que permitió la germinación normal de las semillas y el crecimiento de la planta. Se utilizaron dos especies de plantas establecidas en OECD 208, el arroz y la cebolla, las cuales se consideran plantas superiores sensibles a los productos químicos.

El sustrato de referencia se combinó con 25 y 50 % (m/m) del compost obtenido después de la desintegración del material de ensayo y del compost considerado como control/blanco, obtenido de un proceso paralelo sin la adición del material de ensayo. Una vez elaborada la mezcla del sustrato de referencia con el compost, se colocó en cada bandeja un mínimo de 200 g de la mezcla y 100 semillas. El porcentaje de humedad se controló gravimétricamente al 70-100 % de su capacidad de retención de agua durante todo el experimento.

Los criterios de evaluación consistieron en la comparación del número de germinaciones (número de plantas que crecen), altura de los brotes (cm) y la biomasa (% húmeda o seca) de la planta obtenidos con la muestra de compost y con el blanco en todas las proporciones de mezcla (0, 25 o 50 % de compost). El análisis posterior correspondió al cálculo de la velocidad de germinación y la biomasa como porcentaje de los valores correspondientes obtenidos con el control. Estos resultados permitieron determinar si el compost presenta ecotoxicidad. El diseño experimental consideró dos repeticiones por

tratamiento.

Para el análisis estadístico se estableció una relación dosis-respuesta en términos de una ecuación de regresión. Para el crecimiento de las plántulas (peso y altura) como resultados de la tasa de aplicación efectiva (25 o 50 % de compost) y sus límites de confianza, se realizó el análisis de regresión no lineal de Bruce-Versteeg.

5.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en el software *Microsoft Excel 2013*, empleando sus herramientas de análisis de datos, funciones estadísticas y gráficos para interpretar los resultados; que se facilitan en los complementos de *Análisis de datos* y *Real Statistics* y son explicados por Zaiontz (s.f.-a; s.f.-b, s.f.-c, s.f.-d y s.f.-e). Específicamente, primero se evaluó la normalidad de los resultados por medio de una prueba de *Shapiro-Wilk*, aplicando la fórmula = *SWTEST*(*número1*, [*número2*], ...). Estableciendo un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$.

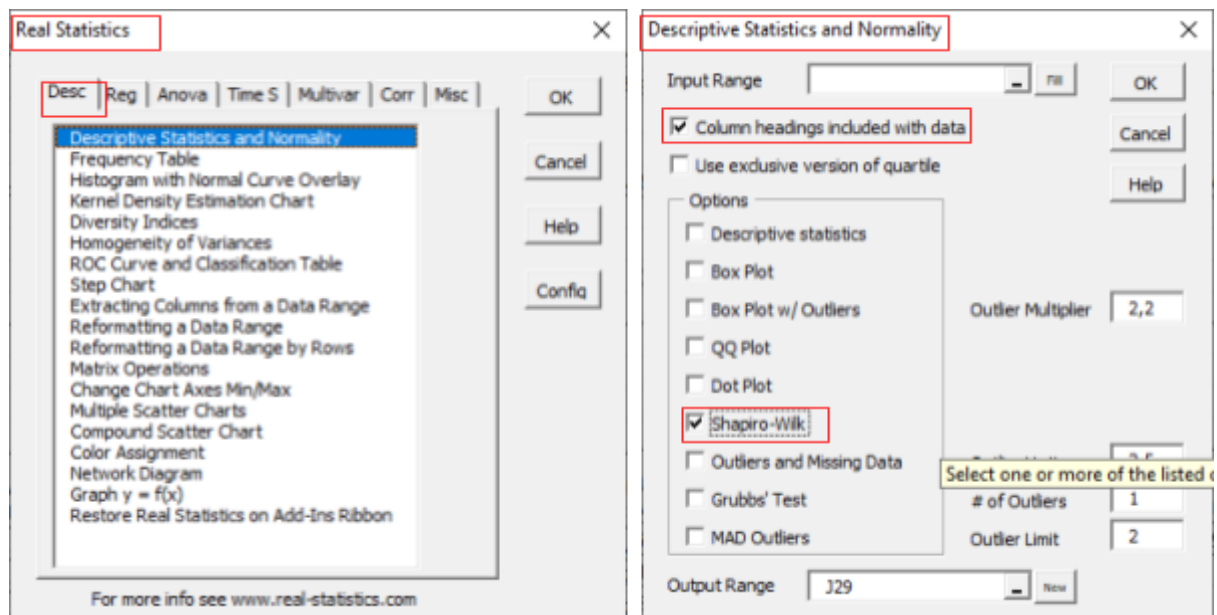
Después se analizó la homogeneidad de la varianza con las pruebas de *Levene* y *Fligner-Killeen*, aplicando respectivamente las fórmulas del complemento *Real Statistics*: =*LEVENE*(*número1*, [*número2*], ...) y =*FKTEST*(*número1*, [*número2*], ...) (Zaiontz, s.f.-d). Si bien la prueba de *Levene* es ideal para evaluar la homogeneidad de la varianza de un grupo de datos, se hizo la prueba de *Fligner-Killeen* de respaldo para garantizar que se cumpliera la condición de los análisis paramétricos, en caso de tener valores atípicos. Cabe mencionar que se establece un $\alpha = 5\%$ para todos los análisis y se consideran las muestras independientes y aleatorias. Por lo tanto, al comparar α con el *valor p* resultante:

- $p > 0,05$: No se rechaza la hipótesis nula (los datos son normales y las varianzas son homogéneas).
- $p \leq 0,05$: Se rechaza la hipótesis nula (los datos no son normales ni las varianzas homogéneas).

Para analizar la normalidad de los resultados, se ordenaron en una hoja de *cálculo*, los grupos de interés (tipos de compostaje) en columnas. Cabe mencionar que se debe hacer esto para cada variable (N, C, pH y demás). Seguido, se abre el complemento de *Excel-Real Statistics* para acceder a la opción de *Estadística Descriptiva y Normalidad*, ubicada en la ventana de *Estadística Descriptiva y Utilidades*. Por último, se seleccionan los datos que se desean analizar y la opción de *Shapiro-Wilk*, antes de aceptar, como se muestra en la Figura 25 (Zaiontz, s.f.-e).

Figura 25

Prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk) de Microsoft Excel 2013 - Real Statistics

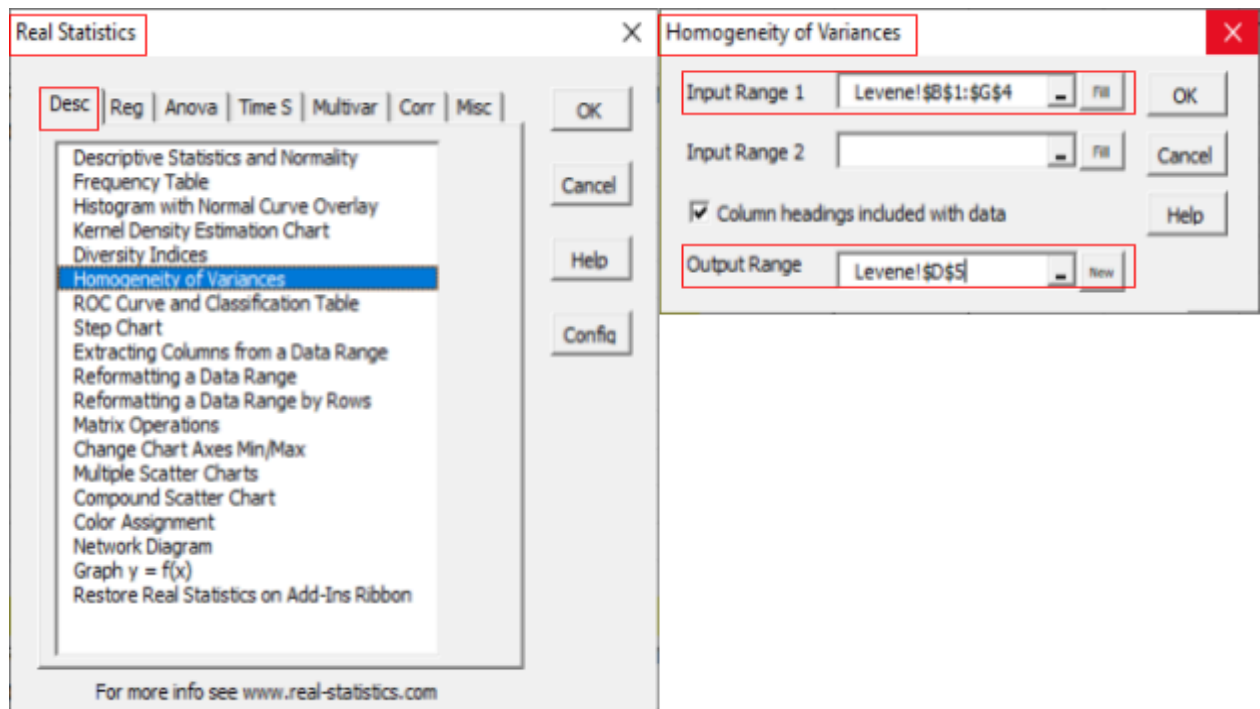


Fuente: Fotografías propias.

Por otro lado, para analizar la homogeneidad de la varianza, primero se abre la opción de *Prueba de Homogeneidad de Varianza* que también está ubicada en la ventana de *Estadística Descriptiva y Utilidades* del complemento de *Excel-Real Statistics*. Se seleccionan los datos que se desean analizar, considerando que estos deben ir ordenados en columnas por grupo de interés. Por último, se da aceptar para que se desplieguen los resultados (*Levene y Fligner-Killeen*), como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Prueba de Homogeneidad de Varianza de Microsoft Excel 2013 - Real Statistics



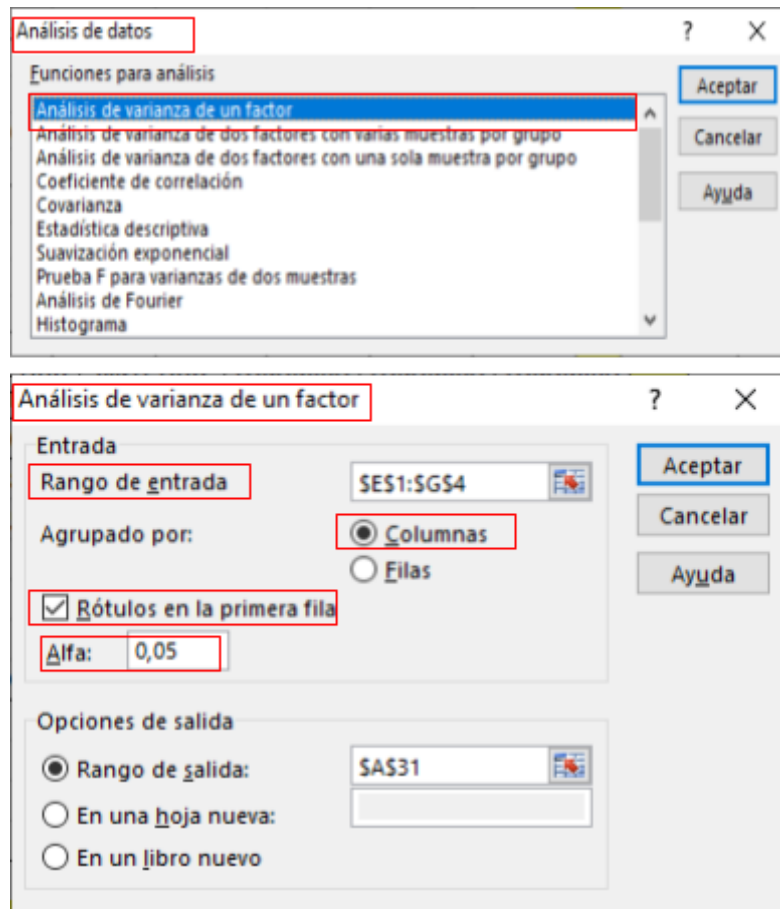
Fuente: Fotografías propias.

En caso de cumplir con estos supuestos, se aplica una prueba paramétrica de *Análisis de Varianza de un factor (ANOVA)* ($\alpha = 0,05$) para identificar si existen diferencias significativas entre los tratamientos, al comparar sus medias; ya que este análisis es ideal cuando se tiene tres o más grupos. De lo contrario, se utiliza una prueba no paramétrica para determinar si existe diferencia significativa entre los tratamientos. Si bien es cierto los datos recopilados en este trabajo son continuos, al no cumplir con el supuesto de normalidad se recomienda la prueba de Kruskal-Wallis.

Un ANOVA se puede realizar al abrir la opción de *Análisis de varianza de un factor*, ubicada en la ventana de *Análisis de datos* (Zaiontz, s.f.-a). Una vez abierta dicha ventana, se seleccionan los datos que se desean analizar, considerando que estos deben ordenarse en columnas, según los grupos de interés, para cada una de las variables en estudio. Seguido, se establece el alfa (0,05) y se da aceptar, como se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Análisis de Varianza de un factor (ANOVA) ($\alpha = 0,05$) de Microsoft Excel 2013



Fuente: Fotografías propias.

El software adiciona el resultado del *Valor F* y el *Valor crítico F*, los cuales se pueden utilizar para determinar si existe diferencia significativa entre los grupos. Cabe mencionar que el *Valor crítico F* se establece en función del α y los *grados de libertad*, que corresponden al *número de datos* que se tiene por *número de grupos menos una unidad* y el *número total de datos entre grupos menos una unidad*. Por lo tanto, al coincidir dicho número para todos los tratamientos (mismo número de repeticiones experimentales), el *Valor crítico F* se vuelve una constante para este caso y es establecido por el mismo software *Excel* a partir de su base de datos de funciones estadísticas. De esta forma, se establece que:

- No se rechaza la hipótesis nula (No existe diferencia significativa).
 - $p > 0,05$.
 - $\text{Valor } F < \text{Valor crítico } F$.
- Se rechaza la hipótesis nula (Existe diferencia significativa).
 - $p \leq 0,05$.
 - $\text{Valor } F > \text{Valor crítico } F$.

Para realizar una prueba de Kruskal-Wallis (Zaiontz, s.f.-c), primero se ordenaron en columnas los grupos de interés. Después se creó una columna única con todos los valores y una columna adicional, preferiblemente en paralelo, donde se especificó a qué grupo / tratamiento pertenece cada valor. Seguido, se ordenó el conjunto de datos en orden ascendente y se aplicó un *rango* para cada valor por medio de la ecuación

=JERARQUIA.MEDIA(número; referencia; [orden]). Para obtener la sumatoria de los rangos de cada grupo (R_i), se aplicó la ecuación =SUMAR.SI(rango; criterio; [rango_suma]). Por otro lado, el número de valores por grupo se abstrajo por medio de la ecuación =CONTAR.SI(rango; criterio). Finalmente, se aplicó la ecuación de Kruskal-Wallis (Ecuación [8])

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} - 3(n+1) \quad [8]$$

Donde:

- H: Valor H de prueba Kruskal-Wallis.
- n: Número total de datos.
- R_j : Sumatoria de rangos por grupo.
- n_j : Número de datos por grupo.

Para su interpretación, primero se estableció un $\alpha = 0,05$ y se calculó un *valor chi-cuadrado* (χ^2), ya que el *valor H* sigue dicha distribución con $k - 1$ grados de libertad hacia la cola derecha. Donde k es el número de grupos analizados. Esto se realizó por medio de la fórmula =DISTR.CHICUAD.CD(Valor H; Grados de libertad), por lo tanto:

- $\chi^2 > 0,05$: No se rechaza la hipótesis nula (No existe diferencia significativa).
- $\chi^2 \leq 0,05$: Se rechaza la hipótesis nula (Existe diferencia significativa).

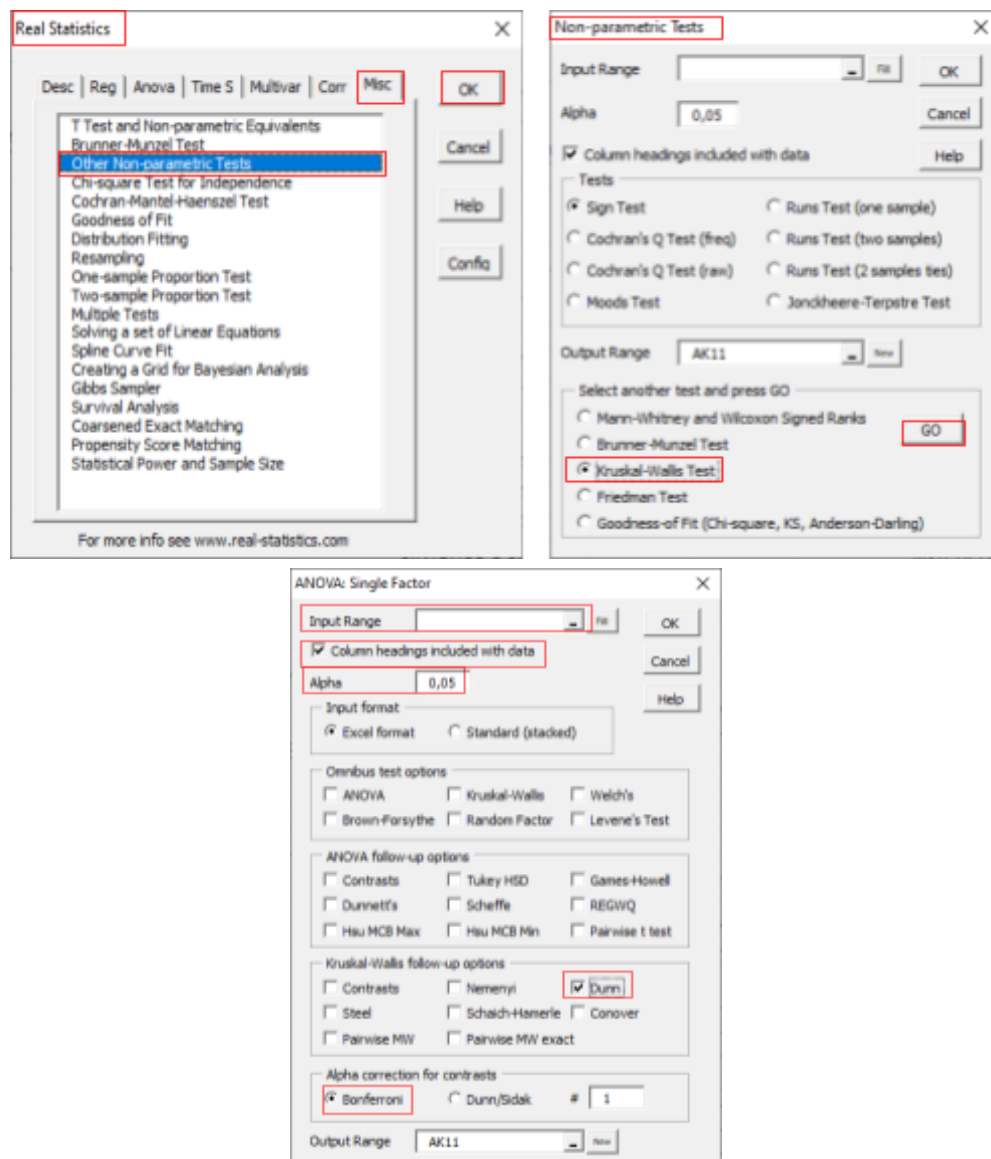
Por último, en caso de obtener diferencias significativas en las pruebas de Kruskal-Wallis o ANOVA, se realizaron análisis post hoc no paramétricos (prueba de Dunn con corrección de Bonferroni) o paramétricos (Turkey), respectivamente. Estas pruebas son ideales para identificar entre cuáles tipos de compostaje existen diferencias significativas específicamente.

Para realizar una prueba de comparación múltiple de Dunn en Excel, se usó el complemento *Real Statistics* en la ventana de *Herramientas Diversas*, para seleccionar la opción de *Otras Pruebas No Paramétricas*, como se muestra en la Figura 28. Por último, se seleccionaron los datos que para el análisis, se estableció el $\alpha = 0,05$, y se seleccionó la prueba de Dunn con la corrección de Bonferroni (Zaiontz, s.f.-b); donde:

- $p > 0,05$: No se rechaza la hipótesis nula (No existe diferencia significativa).
- $p \leq 0,05$: Se rechaza la hipótesis nula (Existe diferencia significativa).

Figura 28

Prueba de comparación múltiple de Dunn con corrección de Bonferroni ($\alpha = 0,05$) de Microsoft Excel 2013



Fuente: Fotografías propias.

6. RESULTADOS

6.1. Grado de desintegración y el proceso de compostaje del polímero biodegradable PLA

6.1.1. Preparación del inóculo sintético

A continuación se presenta el contenido de humedad y el porcentaje de masa seca de los componentes del compost sintético en la Tabla 3. Estos resultados se obtuvieron a partir del secado en un horno de convección forzada, como se muestra en las Figuras 29, 30 y 31. Además, se aplicaron las ecuaciones 1 y 2. Con estos valores se formuló el balance de masa, para estimar la cantidad de cada componente dentro de la matriz de compostaje. Los análisis se hicieron por triplicado.

Tabla 3

Contenido de humedad y masa seca presente en los materiales para elaborar el compost sintético

Material	MH (g)	MS (g)	CH (%)	MS (%)
Alimento de conejo	$8,41 \pm 0,616$	$7,90 \pm 0,568$	$6,10 \pm 0,192$	$93,90 \pm 0,191$
Compost maduro	$6,45 \pm 0,286$	$4,85 \pm 0,229$	$24,87 \pm 0,232$	$75,13 \pm 0,232$
Aserrín	$1,618 \pm 0,622$	$1,572 \pm 0,597$	$2,75 \pm 0,515$	$97,25 \pm 0,515$
Urea	$7,35 \pm 0,269$	$7,01 \pm 0,288$	$4,58 \pm 1,177$	$95,42 \pm 1,177$

Notas: Todas las mediciones se hicieron por triplicado. El almidón de maíz y la sacarosa se consideraron como componentes secos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 29

Materiales húmedos del compost sintético dentro de recipientes de aluminio para su secado en un horno de convección forzada



a) Alimento para conejo.



b) Compost maduro.



c) Aserrín.



d) Urea.

Fuente: Fotografías propias

Figura 30

Materiales húmedos del compost sintético dentro de un horno de convección forzada



a) Recipientes de aluminio con material de ensayo.



b) Horno de convección forzada.

Fuente: Fotografías propias

Figura 31

Materiales húmedos del compost sintético dentro de un desecador



a) Materiales secos dentro de un desecador de vidrio.



b) Desecador de vidrio.

Fuente: Fotografías propias

Una vez estimada la masa seca de cada material, se calcula la composición del compost sintético a partir de las ecuaciones 3 y 4. La tabla 4 presenta cuánta masa real se agregó en la mezcla, así como su respectiva tolerancia / diferencia con respecto a los valores teóricos, la cual se obtuvo por medio de la ecuación 5. Al final del proceso, la mezcla quedó conformada con 45,45 % (9,17 kg) de masa seca, de los 20,18 kg de matriz que se elaboró y ningún componente sobrepasó la tolerancia de 5 % permitida por la norma.

Tabla 4*Masa de los componentes para la elaboración de la matriz sintética*

Componente	MS componente (kg)	MH teórica (kg)	MH real (kg)	Diferencia (%)
Aserrín	3,60	3,70	3,72	0,65
Alimento de conejo	2,70	2,86	2,87	0,13
Compost maduro	0,90	1,12	1,12	0,29
Almidón de maíz	0,90	0,90	0,91	0,65
Sacarosa	0,45	0,45	0,45	0,97
Aceite de maíz	0,36	0,36	0,36	0,28
Urea	0,09	0,10	0,10	1,64
Agua	-	10,50	10,65	1,35
Total	9,00	20,00	20,18	0,896

Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Preparación del inóculo artesanal

Durante la puesta en marcha de los reactores Takakura (Figura 32), se logró una adecuada integración del refuerzo microbiano con la matriz artesanal y los residuos sólidos. En cada reactor se incorporaron $4,00 \text{ kg} \pm 0,772 \text{ g}$ de compost, cantidad que se mantuvo constante en todas las unidades experimentales al inicio del compostaje. Además, se mantuvo la proporción de $\sim 1 \%$ en la relación entre la matriz Takakura y el PLA. Esta relación permitió estandarizar las condiciones de ensayo para evaluar el comportamiento del polímero durante el proceso de compostaje.

Figura 32*Preparación reactores Takakura*

Nota: a) Bolsa geotextil negro para contener matriz artesanal. b) Bolsa geotextil negro con compost Takakura dentro de una caja semi calada de plástico. c) Tapa de geotextil negro para reactor Takakura.

Fuente: Fotografías propias

6.1.3. Control del proceso de compostaje

6.1.3.1. Control de olor y aspecto visual a lo largo del proceso de compostaje

Los reactores que contenían el compost sintético se examinaron durante la maduración los primeros dos días, y nuevamente 14 días después de iniciado el proceso. En la inspección inicial, la matriz sintética presentó un olor ácido característico, el cual desapareció al cabo de 14 días. A partir de entonces, durante el resto del proceso de compostaje, se percibió un olor a tierra. Este comportamiento coincide con lo estipulado por la norma AENOR (2006) y el trabajo de Torrez (2023).

En cuanto al aspecto visual, el color tiende a cambiar las dos primeras semanas de transcurrido el proceso, por lo que en este periodo se puede registrar el crecimiento de micelios y la variación en el color del residuo sintético. Inicialmente, el color se registra ligeramente naranja debido a la elevada concentración de aserrín. Luego, conforme se avanza en el proceso de compostaje, este se va tornando marrón y oscureciendo, hasta volverse casi negro como la tierra, tal como se puede apreciar en la Figura 33. Lo anterior, concuerda con los hallazgos de Torrez (2023) y lo estipulado por la norma ISO 20200:2004 (AENOR, 2006).

Figura 33

Inspección visual del compostaje sintético durante 12 semanas

Semana de compostaje	Reactores	
	Con PLA de 40 µm	Control
0		
2		
3		

4



5



6



7



8



9



10



11



12



Nota: No se tiene registro de la semana uno de compostaje debido al cierre institucional de fin de año de la UCR.

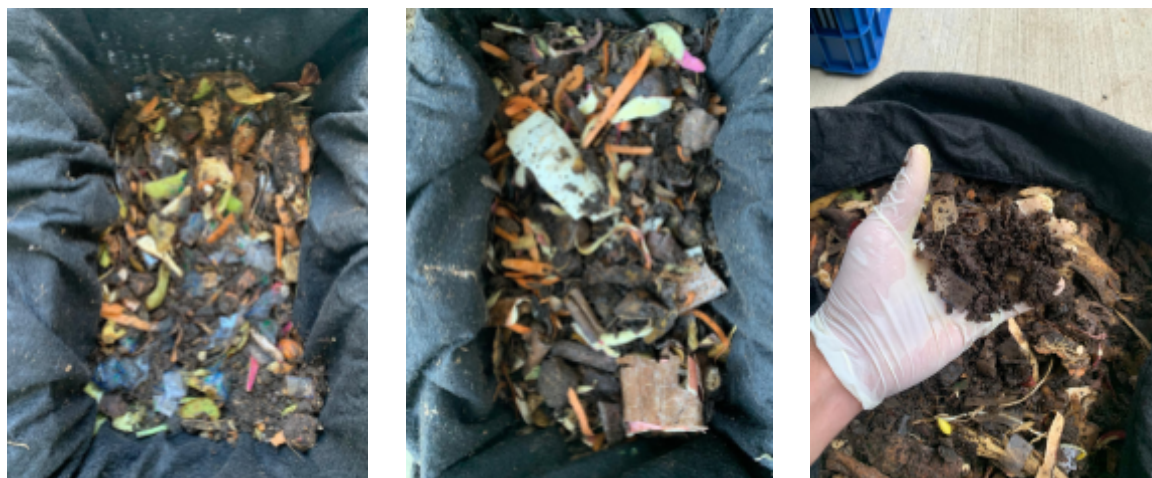
Fuente: Fotografías propias

Los reactores Takakura mantuvieron un olor a tierra mojada a lo largo de todo el proceso de compostaje. En cuanto al aspecto visual, estos presentaron un color negro, exceptuando el color de los residuos orgánicos (verde, naranja, entre otros) que fueron adicionándose a lo largo del compostaje, como se aprecia en la Figura 34.

En su trabajo, Borrero (2014) describe que el tratamiento con Takakura que realizó tuvo un olor agradable durante su proceso, pero que al día 25 se llegó a percibir un leve olor a amoníaco que desapareció a partir del día 35. Chavez Arias et al. (2019) explican que la razón de los malos olores se da por trabajar por encima del 70 % de humedad en la matriz, ya que el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes entre las partículas, reduciendo la transferencia de oxígeno y produciendo una anaerobiosis. Cuando las condiciones se hacen anaeróbicas se originan malos olores y disminuye la velocidad del proceso. Lo anterior, concuerda con la norma ISO 20200:2004, que menciona que para garantizar un buen compostaje, independientemente del sistema que se emplee, es necesario mantener las condiciones medioambientales adecuadas. Para ello, se debe airear correctamente las matrices y mantener un correcto contenido de agua (AENOR, 2006). Por lo tanto, el olor a tierra mojada fue un indicador de que los reactores, tanto sintéticos como artesanales se mantuvieron con poblaciones microbianas sanas y no se aplicó un exceso de humedad.

Figura 34

Aspecto visual de los reactores artesanales con compost Takakura



a) Aspecto visual de los reactores con compost Takakura con PLA.

b) Aspecto visual de los reactores con compost Takakura control.

c) Aspecto general del compost Takakura.

Fuente: Fotografías propias

Durante las inspecciones visuales de los reactores Takakura (Figura 35), no se registró la presencia de plagas. Sin embargo, se observó que algunas de las semillas, procedentes de los residuos orgánicos con los que se alimentaban los reactores, empezaron a germinar. Además, en muchos reactores Takakura se registró la presencia de larvas de mosca soldado (LMS), *Hermetia illucens* L. (Diptera, Stratiomyidae). Según Arroyave Sierra, et. al. (2019), esta mosca es nativa del Neotrópico y actualmente se encuentra distribuida ampliamente por casi todas las áreas cálidas del mundo. Por lo tanto, con base a los indicadores mencionados, se puede decir que el compost estaba sano y la matriz es fértil.

La importancia de la presencia de LMS se debe a que en las últimas décadas se ha considerado el uso de estas larvas para el control de desechos orgánicos en el procesamiento de compostaje debido a que son polípagas y se pueden alimentar de una gran variedad de fuentes (Arroyave Sierra, et. al., 2019). Por su parte, Bermúdez Serrano y Sánchez Velázquez (2023) explican que la mosca soldado no representa una amenaza para otros organismos y no tienen afinidad por el cuerpo humano ni por los alimentos frescos, por lo que no son consideradas especies vectores o plagas. Inclusive, estos insectos son capaces de reciclar gases de efecto invernadero, pues se ha encontrado que sus larvas pueden tomar de 1,950 a 13,41 % y de 5,40 a 18,93 % del carbono y el nitrógeno del sustrato, respectivamente, evitando así su liberación a la atmósfera (Lalander, et. al., 2020). Además, Bermúdez Serrano y Sánchez Velázquez (2023) mencionan que se ha constatado que LMS son capaces de reducir entre 46,7 y 68 % el peso total de la materia orgánica en descomposición como residuos de frutas, vegetales, trigo y orgánicos municipales (Surendra et al., 2020).

Figura 35

Inspección visual para el control de factores externos en el compostaje Takakura



a) Germinación de semillas procedentes de residuos orgánicos.

b) Larvas de mosca soldado dentro de los reactores Takakura.

Fuente: Fotografías propias

6.1.3.2. Control de las poblaciones microbianas a lo largo del proceso de compostaje

El crecimiento de micelios en los reactores Takakura, se apreció principalmente a lo largo del proceso de reforzamiento del compost semilla con las soluciones fermentativas (antes del proceso de compostaje) y en los primeros días una vez iniciado el compostaje (semana cero), como se aprecia en la Figura 36. Esto se debe a que el compost Takakura se mezcló todos los días para garantizar que la matriz artesanal (compost y residuos orgánicos) fuera lo más homogénea posible y garantizar el mayor contacto de la misma con el polímero.

En cuanto al crecimiento de micelios en los reactores sintéticos, estos se registraron 14 días después de iniciado el proceso tanto en el compostaje con polímero, como en los controles. Los microorganismos principalmente proliferaron en las esquinas de los reactores, donde se conservaba más humedad. Sin embargo, su presencia no generó malos olores y se fue reduciendo conforme se revolvía el compost, según el cronograma (Tabla 2). Durante la inspección visual, los micelios se lograron ver a simple vista, hasta el día 27 de compostaje, tal como se muestra en la Figura 36.

Figura 36

Inspección visual de compostaje sintético y Takakura, control de micelios a lo largo del proceso



Nota: a) Micelios durante refuerzo microbiano. b) Micelios en la semana cero de compostaje Takakura. c) Día 14 de compostaje sintético. d) Día 22 de compostaje sintético. e) Día 27 de compostaje sintético.

Fuente: Fotografías propias

6.1.3.3. Control del contenido de humedad, temperatura y el pH a lo largo del proceso de compostaje

6.1.3.3.1. Control del contenido de humedad a lo largo del proceso de compostaje

El monitoreo de la humedad a lo largo del proceso de compostaje se realizó por inspecciones sensoriales visual, olfato y tacto en todos los reactores. Además, en el compost sintético, se aplicó el método gravimétrico sugerido por la norma ISO 20200:2004 (AENOR, 2006) y aplicado por Torrez (2024), que se puede apreciar en el cronograma (Tabla 2).

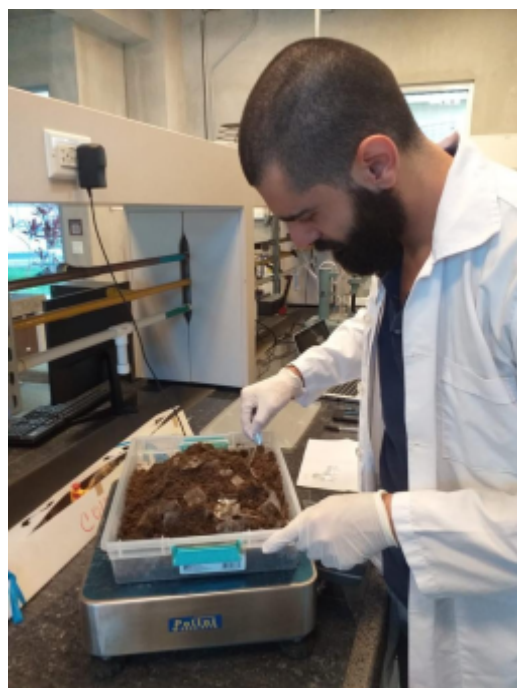
Los reactores sintéticos empezaron con 55 % de humedad, lo cual equivale a $1,100 \text{ kg} \pm 5,48 \text{ g}$, de los $2,00 \text{ kg} \pm 9,97 \text{ g}$ de su masa inicial y se les fue monitoreando la humedad, aplicando el método gravimétrico por medio de una balanza de precisión. En promedio cada reactor sintético, dentro de la incubadora perdía $13,81 \pm 6,93 \text{ g}$ de agua/día, la cual fue reincorporándose con agua destilada para cada reactor, según su masa inicial y el cronograma de la Tabla 2, como se muestra en la Figura 37. De esta forma, se mantuvieron los reactores sintéticos con PLA y controles en $2,02 \pm 0,0230 \text{ kg}$ y $2,01 \pm 0,0243 \text{ kg}$, respectivamente, hasta el día 30 de compostaje.

Figura 37

Método gravimétrico para el control de la humedad en los reactores con el compost sintético



a) Hidratación del compost sintético.



b) Mezcla del compost sintético.

Fuente: Fotografías propias

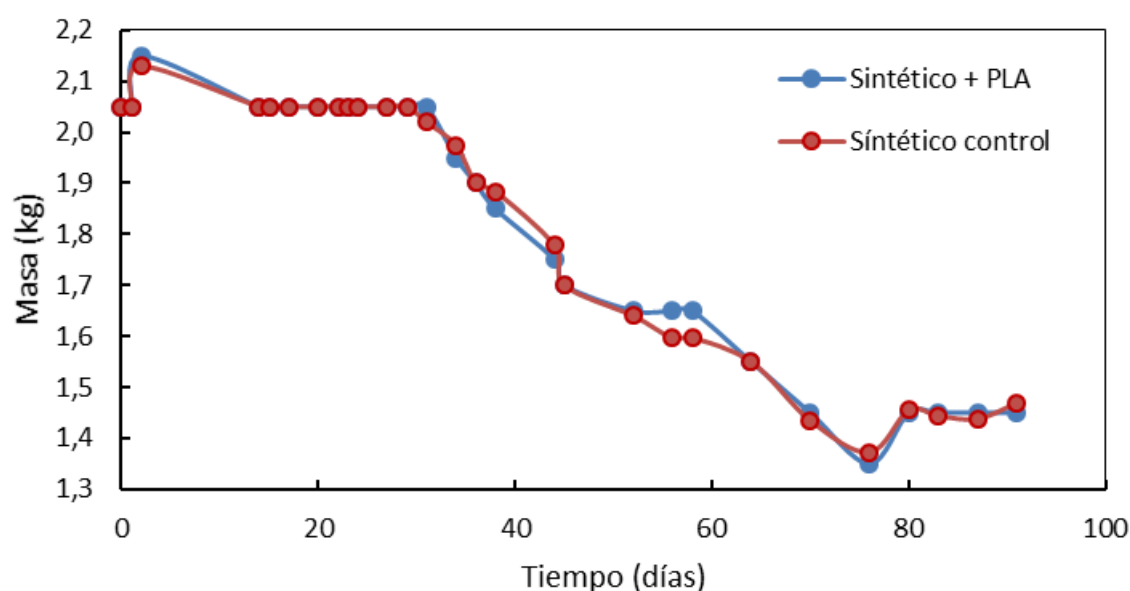
Seguidamente, se dejó de incorporar agua destilada en los reactores para llevar el peso de cada uno a un 80 % de su masa inicial del día 30 al 60. Sin embargo, no se alcanzó dicha masa hasta el día 52. En promedio, se mantuvo la masa de los reactores con PLA en $1,744 \pm 0,1756 \text{ kg}$ y en los controles en $1,734 \pm 0,1794 \text{ kg}$; lo cual equivale a $86,86 \pm 8,75 \%$ y $86,66 \pm 8,97 \%$ de las masas iniciales, respectivamente.

A partir del día 60 hasta el día 90 que corresponde al final del compostaje, se debía reducir la masa de los reactores al 70 % de su masa inicial, lo cual se alcanzó a partir del día 70. En promedio, los reactores con PLA tuvieron una masa de $1,376 \pm 0,0245 \text{ kg}$,

equivalente al $68,51 \pm 1,220$ % de su masa inicial. Por otro lado, los reactores control se secaron hasta el $69,23 \pm 1,666$ % de su masa inicial, trabajando con gramajes de $1,385 \pm 0,0333$ kg. Dicho proceso se puede apreciar en la Figura 38.

Figura 38

Variación de la masa versus el tiempo a lo largo del compostaje sintético



Fuente: Elaboración propia

Las inspecciones sensoriales no registraron malos olores ni encharcamientos dentro de los reactores. Estos son indicadores de que se trabajó sin excesos de humedad. Sin embargo, se debe mencionar que debido al cierre institucional de la UCR de fin de año, se decidió sobrecargar con agua los reactores para que estos no estuvieran deshidratados al regresar. Para ello, se supuso que se perdía $13,81 \pm 6,93$ g de agua/día en promedio, a la vez se consideró que no se debía exceder de humedad los reactores por tanto tiempo para evitar que se formaran condiciones anaeróbicas. Por lo tanto, en el día dos de tratamiento se agregó $80,93 \pm 0,806$ g de agua en los reactores sintéticos con PLA; mientras que a los controles $81,35 \pm 2,37$ g.

Por su parte, en los reactores Takakura se hicieron inspecciones sensoriales visuales, de olfato y tacto, para asegurarse que no se tuviera exceso de humedad en las matrices. Las inspecciones corroboraron que no había malos olores, por lo tanto se trabajó dentro de los niveles de humedad recomendados. Además, no se generaron lixiviados de los desechos orgánicos, pues las telas de geotextil y los fondos de las cajas semicaladas se mantuvieron siempre secos. Finalmente, en las inspecciones de tacto, al realizar la prueba de la mano, tampoco se generaron lixiviados a través de los dedos y los terrones se lograban compactar sin ningún problema, creándose una bola de compost, tal como se muestra en la Figura 39.

Figura 39

Inspección sensorial por tacto para el control de humedad de los reactores con el compostaje Takakura



Fuente: Fotografías propias

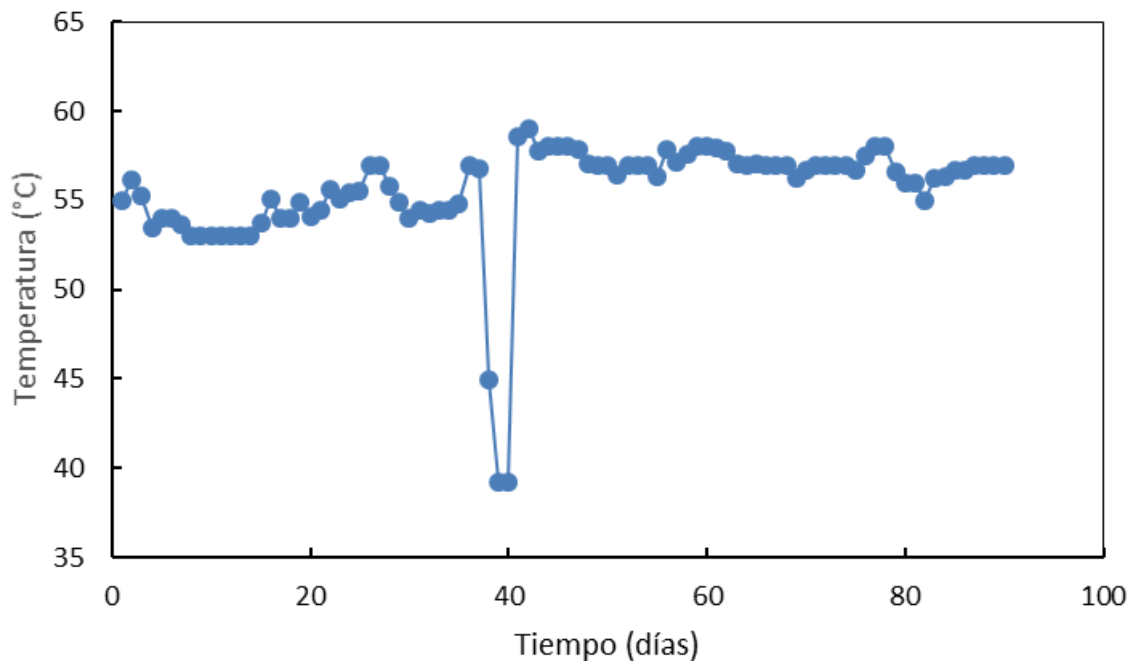
Al inicio del compostaje los reactores se alimentaron con ~500 g/día de residuos orgánicos. Sin embargo, conforme se fueron saturando los reactores con materia orgánica en descomposición, se decidió alimentarlos con 500 g dos días por semana a partir de la sexta semana de compostaje. Entre las semanas nueve y doce, los reactores se alimentaron solo una vez por semana. Durante la maduración (semana 12-14), no se incorporaron residuos orgánicos. Cabe mencionar que se revolvieron las matrices con ayuda de una pala, cada vez que se alimentaban o se hacían inspecciones sensoriales, entre dos o tres veces por semana. De esta forma, los reactores Takakura no se saturaron de humedad, se trabajó con una matriz homogénea y los fragmentos de polímero estuvieron en contacto con el compost y no con los residuos orgánicos.

6.1.3.3.2. Control de la temperatura a lo largo del proceso de compostaje

La temperatura promedio de los reactores dentro de las incubadoras fue de $55,58 \pm 3,19$ °C, aunque la temperatura de la incubadora se estableciera a $58,00 \pm 2,00$ °C. Estos resultados se presentan en la Figura 40. Los valores límites en los reactores sintéticos corresponden a temperaturas máximas de $56,25 \pm 2,54$ °C y mínimas de $53,09 \pm 5,82$ °C. Cabe mencionar que entre los días 38 y 40 de compostaje se presentó una falla eléctrica en el laboratorio de Bioenergía y la incubadora que se usó al inicio se descompuso. En consecuencia, la temperatura disminuyó a $\sim 39,22$ °C. Debido a esta situación se movieron los reactores a otra incubadora (*Yamato, IC603CR*). A pesar de la falla eléctrica, el proceso de compostaje no se comprometió y se obtuvo una degradación exitosa del material de ensayo.

Figura 40

Temperaturas versus tiempo durante el proceso de compostaje sintético

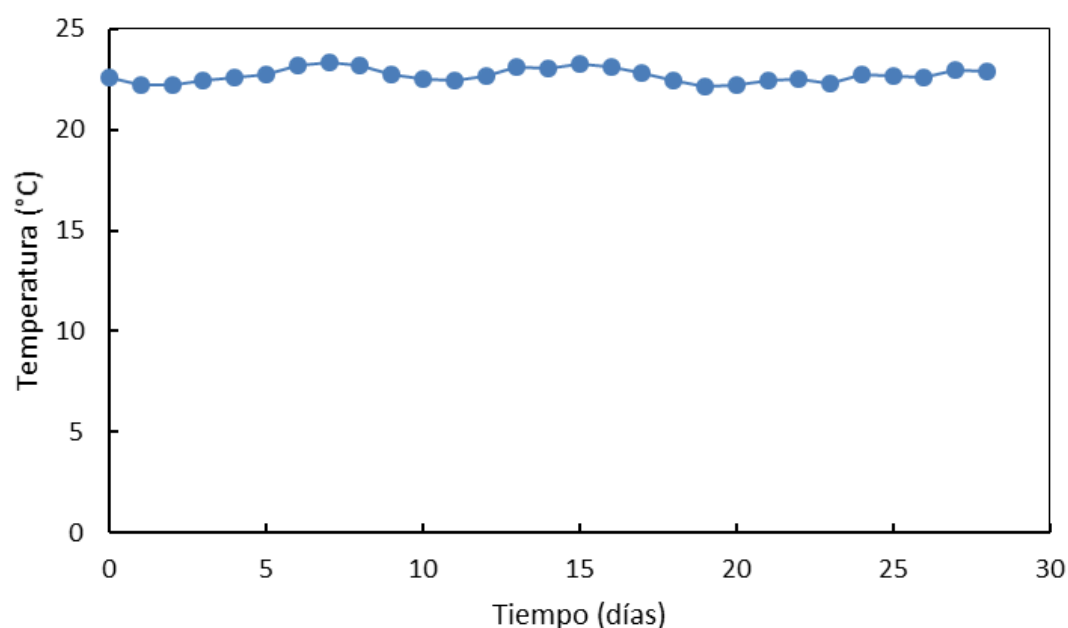


Fuente: Elaboración propia

Una vez terminados los 90 días de compostaje que establece la norma ISO 20200:2004, se sacaron los reactores de la incubadora y se dejaron a temperatura ambiente dentro del laboratorio para su maduración. Durante este periodo, el compost sintético se mantuvo a temperaturas de $22,68 \pm 0,340$ °C con valores límites máximo y mínimo de $23,83 \pm 0,600$ °C y $21,72 \pm 0,590$ °C por día, respectivamente como se aprecia en la Figura 41.

Figura 41

Temperatura promedio durante el proceso de maduración en los reactores sintéticos



Fuente: Elaboración propia

La Figura 42 y la Tabla 5 muestran que la temperatura ambiental se registró en $23,48 \pm 2,98$ °C. Por su parte, la temperatura de trabajo del compost Takakura se mantuvo a una temperatura promedio de 27,00 °C en los reactores. Si bien la diferencia de temperatura con respecto al ambiente es un indicador de la actividad metabólica de los microorganismos, al igual que los trabajos de Ruiz et al. (2013) y Segura (2023), los reactores no alcanzaron las condiciones necesarias ($T > 50$ °C) para que se diera la hidrólisis en la estructura molecular del PLA e iniciara la biodegradación. Sin embargo, se alcanzaron temperaturas máximas de 36,06 y 33,27 °C en los reactores con polímero y controles, respectivamente al inicio del tratamiento, cuando la matriz de los reactores estaba siendo alimentada diariamente con residuos orgánicos.

Tabla 5

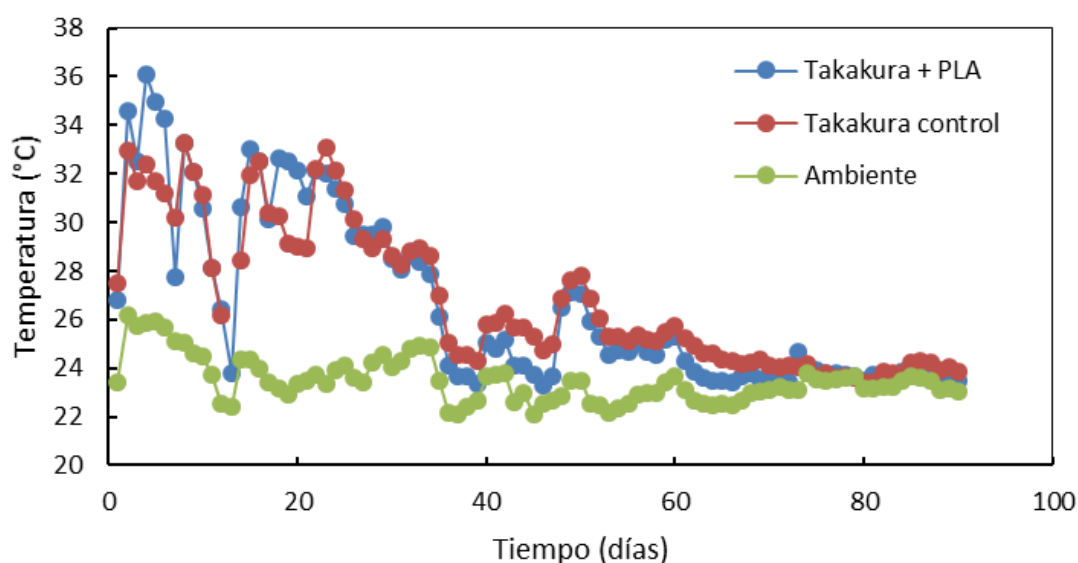
Temperaturas de trabajo dentro de los reactores con el compost Takakura durante el compostaje.

Sensor	Temperatura (°C)		
	Promedio	Máxima	Mínima
Takakura + PLA	$26,66 \pm 3,60$	$27,84 \pm 4,34$	$25,13 \pm 3,11$
Takakura control	$26,84 \pm 2,98$	$27,74 \pm 3,08$	$25,67 \pm 3,03$
Ambiente	$23,48 \pm 2,98$	$25,50 \pm 0,89$	$21,85 \pm 1,10$

Fuente: Elaboración propia

Figura 42

Temperatura versus tiempo durante el proceso de compostaje dentro de los reactores Takakura



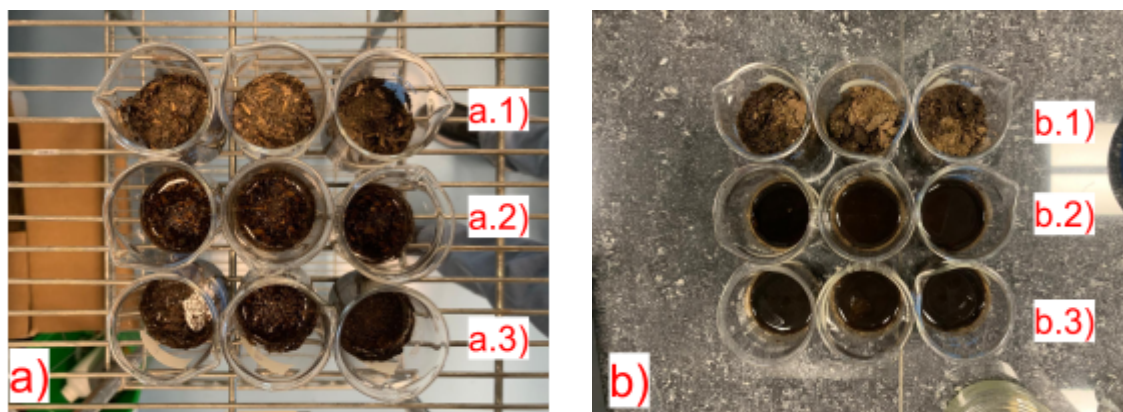
Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.3. Resultados del pH durante el proceso de compostaje

Para el monitoreo del pH de los reactores sintéticos, primero se recolectó $10,04 \text{ g} \pm 0,0392 \text{ g}$ de compost de los reactores en beakers de 100 ml y se hidrataron con $25,22 \text{ g} \pm 0,1099 \text{ g}$ de agua destilada, para luego agitar a 120 rpm a temperatura ambiente por 2 h, en una Incubadora con agitación orbital digital marca *Thermo Scientific* modelo *MaxQ 4450* (Figura 21), como se muestra en la Figura 43. Después se dejó reposar las muestras por 30 min y finalmente se hicieron las mediciones de pH.

Figura 43

Muestras de compost hidratados para la medición de pH



Nota: a.1) Compostaje Takakura inicial; a.2) Compostaje Takakura con PLA final; a.3) Compostaje Takakura control final; b.1) Compostaje sintético inicial; b.2) Compostaje sintético con PLA final; b.3) Compostaje sintético control final.

Fuente: Fotografías propias

Como se puede apreciar en la Tabla 6, los valores iniciales de pH de las matrices de compostajes fueron de 6,62 y 6,52 aproximadamente, para los reactores artesanales y sintéticos respectivamente. Al finalizar el proceso de maduración en todos los reactores se dió una disminución en su acidez, alcanzando valores cercanos a 8. Las muestras estuvieron a $23,89\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$ al momento de la medición y las pruebas se hicieron por triplicado.

En su trabajo, Torrez (2023) explica que el rango óptimo de pH para el desarrollo de la actividad microbiana está entre 6,5 y 8,0 y que esta es una de las variables que afectan los sistemas de compostaje. Por su parte, Segura (2023) menciona que al inicio del compostaje es recomendable tener valores de pH cercanos a 7. En sus trabajos Torrez (2023) y Segura (2023) tuvieron valores de pH iniciales de 6,4, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en la presente investigación. Sin embargo, al final del proceso, Torrez (2023) no tuvo diferencias significativas con respecto al pH inicial y Segura (2023) tuvo una acidificación en su matriz con PLA contenida en cajas, obteniendo valores de hasta 4,8; mientras que en las composteras rotatorias el pH subió a 7. A partir de dichos resultados y como se puede apreciar en la Tabla 6, se logró mantener un pH dentro de los valores recomendados tanto para la matriz sintético como para la Takakura, demostrando que ambos compostajes se mantuvieron sanos y la proliferación de microorganismos, así como la descomposición de la materia dentro de ellas, no tuvieron inconvenientes.

Tabla 6

Resultados de pH a lo largo del proceso de compostaje

Muestra	Masa muestra (g)	Masa agua (g)	Tiempo (días)	pH	Temperatura (°C)
Takakura inicial	$10,01 \pm 0,01$	$25,20 \pm 0,14$	0	$6,62 \pm 0,02$	$25,07 \pm 0,31$
Takakura + PLA	$10,01 \pm 0,02$	$25,16 \pm 0,15$	104	$7,69 \pm 0,34$	$24,37 \pm 0,06$
Takakura control	$10,02 \pm 0,02$	$25,44 \pm 0,19$	104	$7,64 \pm 0,13$	$24,17 \pm 0,21$
Sintético inicial	$10,02 \pm 0,03$	$25,15 \pm 0,51$	0	$6,52 \pm 0,14$	$23,67 \pm 0,15$
Sintético + PLA	$10,11 \pm 0,16$	$25,15 \pm 0,21$	104	$7,98 \pm 0,67$	$23,10 \pm 0,10$
Sintético control	$10,08 \pm 0,11$	$25,22 \pm 0,17$	104	$7,37 \pm 0,96$	$22,97 \pm 0,12$

Nota: Todos los análisis se hicieron por triplicado

Fuente: Elaboración propia

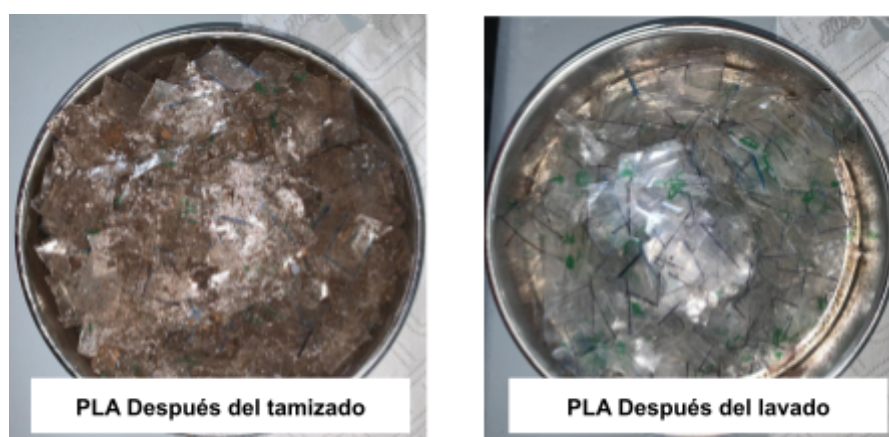
6.1.4. Medición del grado de desintegración

Para los ensayos de biodegradación aerobia, el material objeto de ensayo (PLA de 40 μm) se considera biodegradable si el porcentaje de biodegradación es igual o mayor a 90 %. Por otro lado, se considera desintegrado, si en un tamiz de $> 2\text{ mm}$ no queda retenido más de un 10 % del peso seco inicial del material de ensayo (AENOR, 2001). En cuanto a la variabilidad de los resultados, los grados de desintegración para las tres réplicas no debe ser diferente en más de un 10 % (AENOR, 2006).

Luego de tamizar las matrices de compostaje sintéticas y Takakura, se logró recuperar los fragmentos del polímero que no se degradaron durante el proceso de compostaje de 90 días solo de los reactores Takakura (Figura 44); ya que en la matriz sintética se biodegradan por completo. El material de ensayo recogido de las diversas fases del tamizado se reagrupó y se limpió el exceso de compost. Finalmente, el PLA se secó en un horno a $40 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ al vacío hasta masa constante y se registró una recuperación del $\sim 95\%$ de la masa inicial.

Figura 44

PLA 40 μm no degradado durante el proceso de compostaje Takakura



Fuente: Fotografías propias

Como se puede observar en la Tabla 7, a partir de la ecuación [6] se obtiene el Grado D (%) del polímero a lo largo del compostaje, con el cual se determina que, dentro del compostaje sintético, el material se degradó por completo en todos los reactores. En el compostaje Takakura, se logró una pérdida de masa de $\sim 4,41\%$. En cuanto a la variabilidad de los resultados, los Grados D (%) no difirieron en más de un 10 % para las tres réplicas, por lo que se considera válida la prueba tanto para el compostaje sintético como para el artesanal. De esta forma, se determina que el polímero en estudio, PLA 40 μm , es biodegradable en condiciones de laboratorio (compostaje sintético) con una biodegradabilidad del 100 % dentro del plazo establecido de 90 días por la norma ISO 20200:2004. Sin embargo, dentro del compostaje artesanal tipo Takakura, no se considera biodegradable el material, ya que se desintegró menos del 5 %.

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Torrez (2023) y Segura (2023), quienes concluyen que la degradación de los empaques depende más del tipo de sistema de compostaje que de la estructura molecular del material. Torrez (2023) demostró que el PLA de 20 μm se biodegradó al 100 % en dos semanas en un sistema de compostaje sintético. En contraste, en sistemas tipo caja, Segura (2023) observó una degradación del 6,07 % y en los rotatorios 97,54 %. Además, aunque el PLA de 40 μm también fue completamente biodegradable en compostaje sintético, tardó seis semanas en degradarse, lo que evidencia que el espesor influye en la velocidad de degradación. Por ello, se recomienda seguir investigando PLA con mayores espesores.

Tabla 7

Grado de desintegración del PLA 40 μ m dentro del compostaje sintético y Takakura

Compostaje	m_i (g)	m_r (g)	Grado D (%)	Validación (%)
Sintético	20,00 $\pm$ 0,00	0,00 $\pm$ 0,00	100,00 $\pm$ 0,00	0,00
Takakura	40,00 $\pm$ 0,00	34,70 $\pm$ 0,10	4,41 $\pm$ 0,28	6,24

Nota: Para los cálculos, se considera que se extrajeron aproximadamente 1,541 g y 3,70 g de PLA en cada reactor, sintético y artesanal respectivamente, para realizar las pruebas de caracterización.

Fuente: Elaboración propia

La diferencia en los porcentajes de degradación del material (D %) entre los sistemas de compostaje sintético y Takakura puede atribuirse principalmente a las temperaturas de operación. En los reactores sintéticos, la temperatura se mantuvo por encima del umbral requerido para iniciar la hidrólisis del PLA ($\sim 50^{\circ}\text{C}$), lo cual favoreció su biodegradación. En contraste, los sistemas Takakura no alcanzaron condiciones termofílicas, lo que limitó significativamente la descomposición del polímero. Además, en los sistemas sintéticos, la matriz sólo fue hidratada, lo que restringió la variabilidad y la disponibilidad de nuevos sustratos para los microorganismos, incentivando una mayor interacción con el polímero. Por el contrario, en los reactores Takakura, el suministro constante de residuos orgánicos pudo haber generado una mayor preferencia microbiana por estos sustratos fácilmente degradables, reduciendo así el contacto y la descomposición efectiva del PLA.

6.1.5. Resultados del contenido de sólidos volátiles

Los resultados a partir de la ecuación [7] se presentan en la Tabla 8. Se obtuvo que para los reactores con el compost sintético que tenían PLA, se logró una R (%) $\sim 35\%$ y $\sim 37\%$ para los Takakura; mientras que en los controles este valor fue de $\sim 36\%$ y $\sim 41\%$, respectivamente. Por lo tanto, se considera que todos los tratamientos alcanzaron la madurez establecida ($R \geq 30\%$) por la norma AENOR (2006), para ser utilizadas. Se considera que los valores iniciales fueron los mismos tanto para el control como para los reactores sintéticos.

Tabla 8

Disminución R del contenido total de SV al final del proceso de compostaje sintético y Takakura

Compostaje	MS (fracción)	SV (fracción)	R (%)
Sintético inicial	0,46 ± 0,00	0,73 ± 0,05	
Sintético control	0,40 ± 0,01	0,76 ± 0,10	35,81 ± 9,32
Sintético + PLA	0,38 ± 0,01	0,83 ± 0,02	34,70 ± 3,31
Takakura inicial	0,97 ± 0,01	0,52 ± 0,01	
Takakura control	0,60 ± 0,05	0,51 ± 0,04	40,88 ± 2,27
Takakura + PLA	0,61 ± 0,03	0,52 ± 0,01	36,86 ± 3,70

Nota: Todos los análisis se hicieron por triplicado

Fuente: Elaboración propia

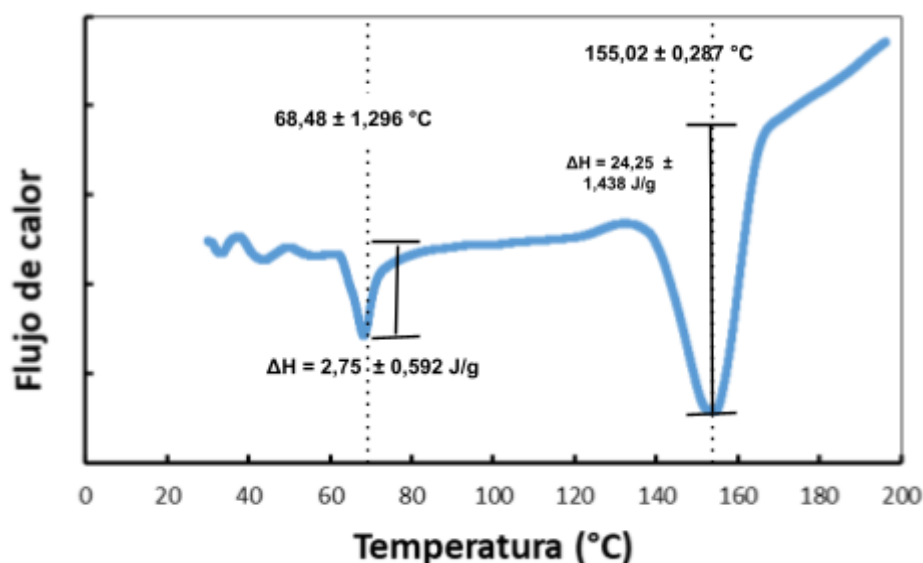
6.1.6. Caracterización del polímero durante el proceso de compostaje

6.1.6.1. Calorimetría de barrido diferencial (DSC)

Como se puede observar en la Figura 45, el empaque presenta dos cambios significativos en la entalpía (ΔH) durante el proceso de calentamiento. Este resultado implica que el material no es puro (100 % PLA) o presenta una T_g y es un bioplástico cristalino como el PP, como explican Segura (2023) y Torrez (2023) que en los dos estudios se registraron ambas transiciones. Sin embargo, de acuerdo con Murillo-Vargas et al. (2020), el PLA puede presentar una transición vítrea entre los 57 y 65 °C aproximadamente, con un calor (Q) de 1,270 J/g; y una temperatura de fusión (T_m) alrededor de 149 °C (Q = 24,65 J/g).

Figura 45

Caracterización en DSC del PLA de 40 μm de espesor antes del compostaje



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de Murillo-Vargas et al. (2020) concuerdan con los resultados obtenidos en el presente estudio, al obtener dos cambios de entalpía. El primer ΔH o T_g a una T_m de $64,38 \pm 1,849 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con un valor $Q = 2,75 \pm 0,592 \text{ J/g}$ y una temperatura pico de fusión (T_{mp}) de $68,48 \pm 1,296 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El segundo cambio de entalpía, corresponde al punto de fusión y se encuentra a una $T_m = 139,96 \pm 0,320 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con un $Q = 24,25 \pm 1,438 \text{ J/g}$ y una $T_{mp} = 155,02 \pm 0,287 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Se intentó determinar la temperatura de cristalización (T_{cc}), para estimar el grado (%) de cristalinidad del PLA antes del proceso de compostaje, empleando $5,25 \pm 0,1000 \text{ mg}$ de material en un proceso de calentamiento y enfriamiento; con tres rampas térmicas distintas, como se muestra en la Tabla 9. Cabe mencionar que todas las muestras se llevaron a una temperatura de equilibrio de $25,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y se mantuvieron en un ambiente isotérmico por $1,00 \text{ min}$ antes de iniciar el proceso de calentamiento. Sin embargo, el polímero presenta una sensibilidad térmica considerable que provocó su desintegración durante el proceso de calentamiento y no fue posible registrar la T_{cc} en el enfriamiento, tal como se muestra en la Figura 46. Por lo tanto, solo se analiza el proceso de calentamiento para determinar la disminución de las T_g y T_m durante el proceso de compostaje.

Tabla 9

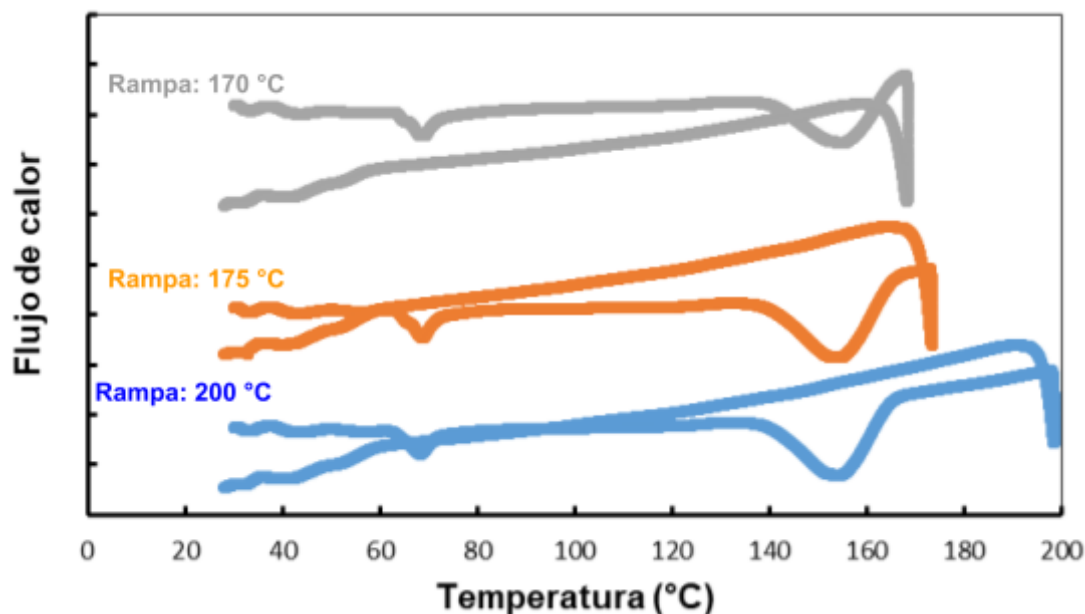
Métodos empleados en el DSC para la determinación de la temperatura de cristalización (T_{cc}) del PLA de $40 \mu\text{m}$

Muestras	Calentamiento	Enfriamiento
1	10,00 $^{\circ}\text{C/min}$ hasta 200,00 $^{\circ}\text{C}$	10,00 $^{\circ}\text{C/min}$ hasta 25,00 $^{\circ}\text{C}$
2	10,00 $^{\circ}\text{C/min}$ hasta 175,00 $^{\circ}\text{C}$	10,00 $^{\circ}\text{C/min}$ hasta 25,00 $^{\circ}\text{C}$
3	10,00 $^{\circ}\text{C/min}$ hasta 170,00 $^{\circ}\text{C}$	10,00 $^{\circ}\text{C/min}$ hasta 25,00 $^{\circ}\text{C}$

Fuente: Elaboración propia

Figura 46

Determinación de la temperatura de cristalización del PLA de 40 μm antes del compostaje



Fuente: Elaboración propia

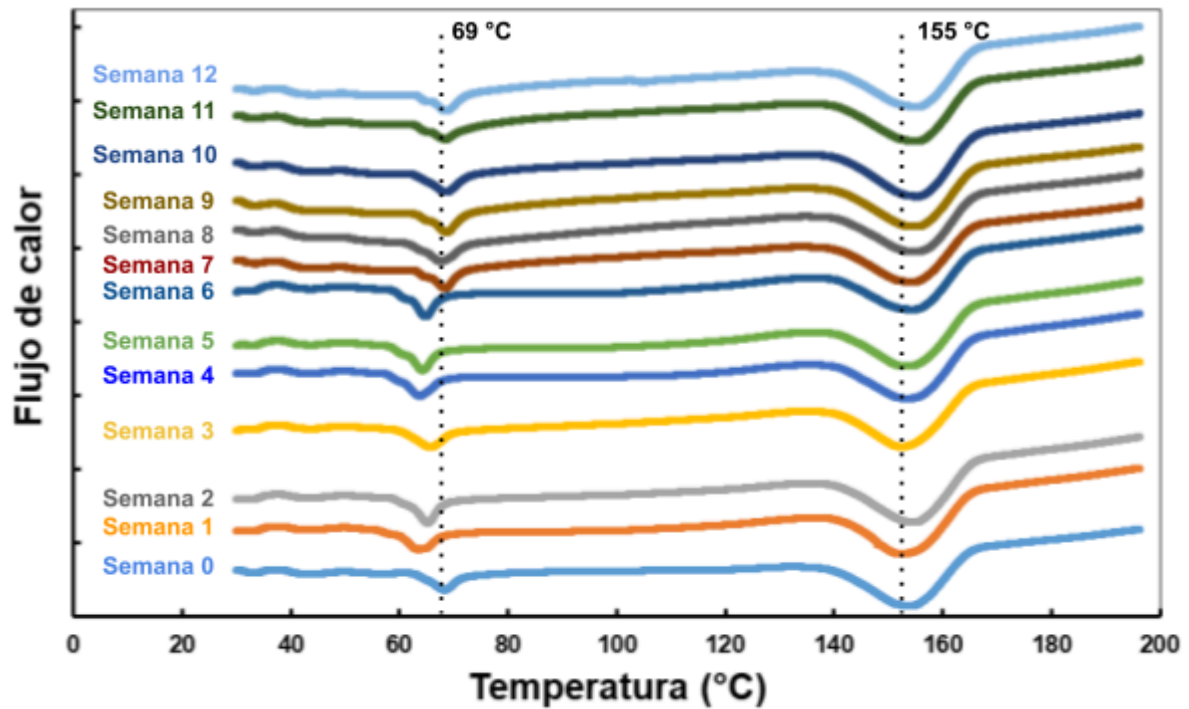
Cuando se analiza la degradación en polímeros por medio de DSC, lo que se busca es una reducción del área bajo la curva de las Tg y Tm, así como una reducción en las temperatura picos de estos eventos. De esta forma, se garantiza que se requiere menos energía para desintegrar el material y que este está perdiendo sus propiedades estructurales durante el proceso de compostaje.

Como se puede observar en la Figura 47, el polímero dentro del compostaje Takakura ha conservado los cambios de entalpía tanto en la transición vítrea como en el punto de fusión. En la Tabla 10 se puede apreciar como a la semana 12 del compostaje artesanal la Tg tiene una disminución del área bajo la curva de 47,62 %, pasando de $2,75 \pm 0,592$ a $1,440 \pm 0,1208$ J/g. Sin embargo, no se registra un desplazamiento de su Tmp, que se identificó en la caracterización inicial en $68,48 \pm 1,296$ °C; y al final del experimento en $68,80 \pm 0,632$ °C. Por otro lado, el punto de fusión antes del compostaje se registra en $24,25 \pm 1,438$ J/g y disminuye en un 47,74 %, finalizando en $12,67 \pm 0,773$ J/g. Con respecto a la Tmp, esta tampoco tuvo un desplazamiento, y se obtuvieron temperaturas al inicio y final del compostaje de $155,02 \pm 0,287$ °C y $156,01 \pm 0,335$ °C, respectivamente.

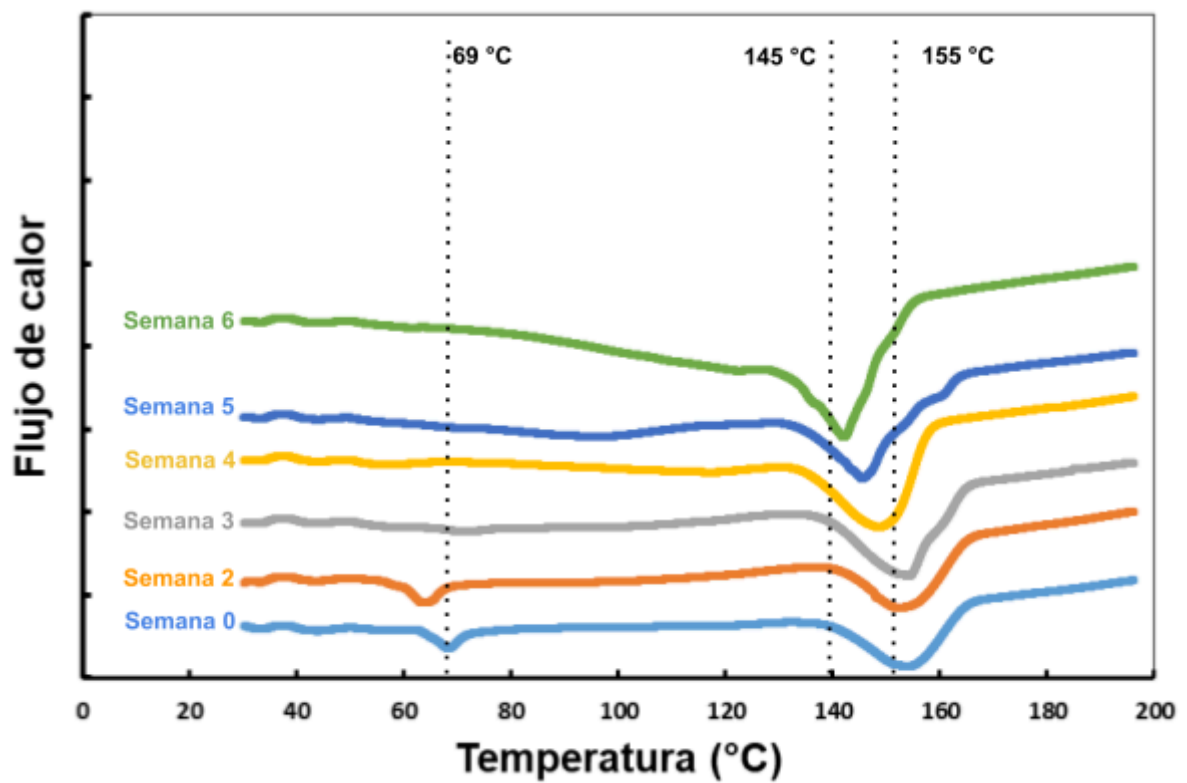
Figura 47

Caracterización en DSC del PLA de 40 μm versus el tiempo para ambos tipos de compostaje (sintético y Takakura)

A) Takakura



B) Sintético



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10*Caracterización del PLA de 40 µm durante el proceso de compostaje Takakura en DSC*

Semana	Transición vítrea (Tg)			Punto de Fusión (Tm)		
	Tm (°C)	Tmp (°C)	Q (J/g)	Tm (°C)	Tmp (°C)	Q (J/g)
0	64,38 ± 1,85	68,48 ± 1,30	2,75 ± 0,59	139,96 ± 0,32	155,02 ± 0,29	24,25 ± 1,44
1	60,33 ± 1,34	63,97 ± 1,66	1,843 ± 0,02	143,99 ± 4,58	154,01 ± 1,64	12,53 ± 0,10
2	61,74 ± 0,70	65,13 ± 0,36	1,952 ± 0,19	140,85 ± 0,76	155,22 ± 0,15	13,09 ± 1,06
3	62,34 ± 1,24	65,69 ± 1,25	1,673 ± 0,13	140,25 ± 0,25	153,30 ± 0,42	12,52 ± 0,99
4	60,89 ± 1,17	64,01 ± 1,18	1,827 ± 0,24	140,17 ± 1,06	154,81 ± 1,40	12,77 ± 0,46
5	61,12 ± 0,37	64,31 ± 0,46	1,713 ± 0,18	141,30 ± 0,90	154,70 ± 0,53	12,23 ± 0,62
6	61,72 ± 0,24	64,71 ± 0,29	1,859 ± 0,18	140,09 ± 0,68	155,33 ± 0,59	12,25 ± 0,58
7	64,96 ± 0,16	68,48 ± 0,14	1,481 ± 0,16	140,24 ± 0,33	155,15 ± 0,58	12,45 ± 0,95
8	64,43 ± 1,44	67,90 ± 1,35	1,760 ± 0,33	140,60 ± 0,89	155,99 ± 1,26	12,46 ± 1,03
9	65,09 ± 0,47	68,74 ± 0,43	1,675 ± 0,26	140,34 ± 0,20	156,00 ± 0,11	13,06 ± 0,41
10	64,86 ± 1,35	68,80 ± 1,01	1,798 ± 0,39	140,40 ± 0,32	155,02 ± 0,50	14,13 ± 1,98
11	64,26 ± 0,90	69,42 ± 1,87	1,570 ± 0,27	140,11 ± 0,32	155,88 ± 0,53	13,02 ± 0,24
12	64,66 ± 1,42	68,80 ± 0,63	1,440 ± 0,12	140,79 ± 0,82	156,01 ± 0,34	12,67 ± 0,77
Variación (%)	0,43	0,46	- 47,62	0,59	0,64	- 47,74

Notas: Todos los análisis se hicieron por triplicado. Tm: Punto de fusión (°C); Tmp: Temperatura pico de fusión (°C); Q: Calor (J/g).

Fuente: Elaboración propia

Dentro del compost sintético, la Tg desaparece a partir de la quinta semana. El punto de fusión disminuye en un 21,81 %, iniciando en $24,25 \pm 1,44$ J/g y registrándose en $18,96 \pm 2,66$ J/g en la sexta semana. La Tmp pasa de $155,02 \pm 0,29$ a $145,25 \pm 3,93$ °C para el mismo tiempo, como se muestra en la Tabla 11. Torrez (2023) explica que una disminución del área bajo la curva de los puntos de transición vítrea y de fusión, así como de sus temperaturas correspondientes, son indicadores de degradación. Con base a lo anterior, el polímero se ha desintegrado en condiciones de laboratorio (compost sintético) pero no ha presentado una biodegradabilidad significativa en el ambiente (compost Takakura).

Tabla 11

Caracterización del PLA de 40 µm durante el proceso de compostaje sintético en DSC

Semana	Transición vítrea (Tg)			Punto de Fusión (Tm)		
	Tm (°C)	Tmp (°C)	Q (J/g)	Tm (°C)	Tmp (°C)	Q (J/g)
0	$64,38 \pm 1,85$	$68,48 \pm 1,30$	$2,75 \pm 0,59$	$139,96 \pm 0,32$	$155,02 \pm 0,29$	$24,25 \pm 1,44$
2	$59,90 \pm 5,49$	$65,79 \pm 7,35$	$1,104 \pm 1,06$	$140,27 \pm 1,15$	$157,34 \pm 2,00$	$17,93 \pm 5,49$
3	$55,87 \pm 7,09$	$63,49 \pm 8,04$	$1,334 \pm 1,27$	$139,00 \pm 2,21$	$155,01 \pm 1,08$	$17,97 \pm 1,78$
4	$50,52 \pm 0,02$	$55,97 \pm 0,07$	$0,415 \pm 0,06$	$134,34 \pm 1,68$	$150,18 \pm 1,99$	$18,38 \pm 1,49$
5				$136,49 \pm 4,04$	$149,89 \pm 5,13$	$17,40 \pm 3,41$
6				$133,87 \pm 1,90$	$145,25 \pm 3,93$	$18,96 \pm 2,66$
Variación (%)	- 100	- 100	- 100	- 4,35	- 6,30	- 21,81

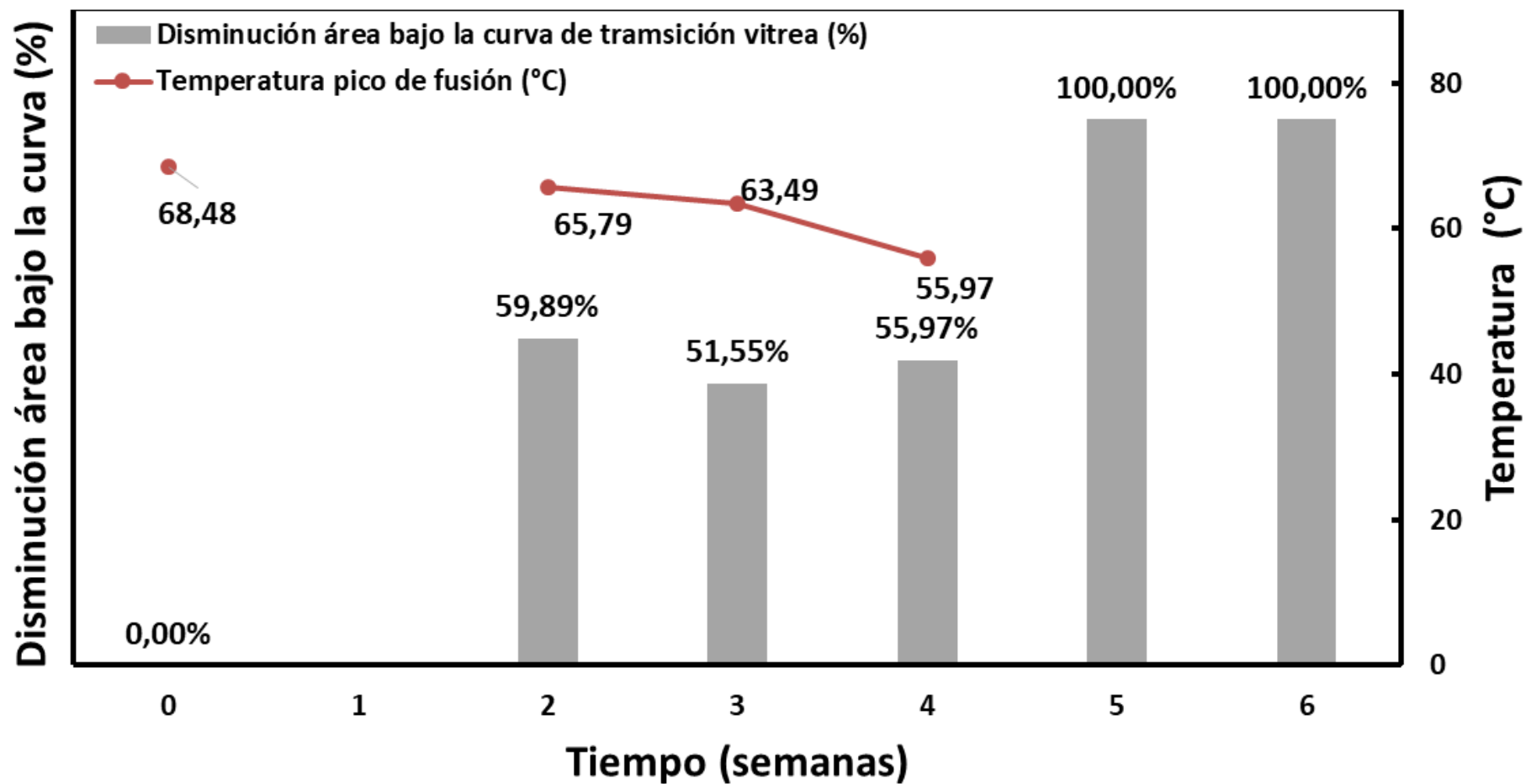
Nota: Todos los análisis se hicieron por triplicado

Fuente: Elaboración propia

La disminución de la temperatura pico de fusión y el área bajo la curva en los cambios de entalpía de transición vítrea se presentan en la Figura 48 y el punto de fusión se presentan en la Figura 49. Estos resultados corresponden a los del polímero durante el tiempo dentro del compostaje sintético. Los resultados dentro del compostaje Takakura se pueden observar en las Figuras 50 y 51. Cabe mencionar que debido al cierre de los laboratorios de la UCR por el fin de año (2023), no se recolectaron las muestras del compostaje sintético durante la primera semana de tratamiento. A partir de la sexta semana, el polímero se encuentra degradado al punto que no es posible la extracción de las muestras para el compost sintético.

Figura 48

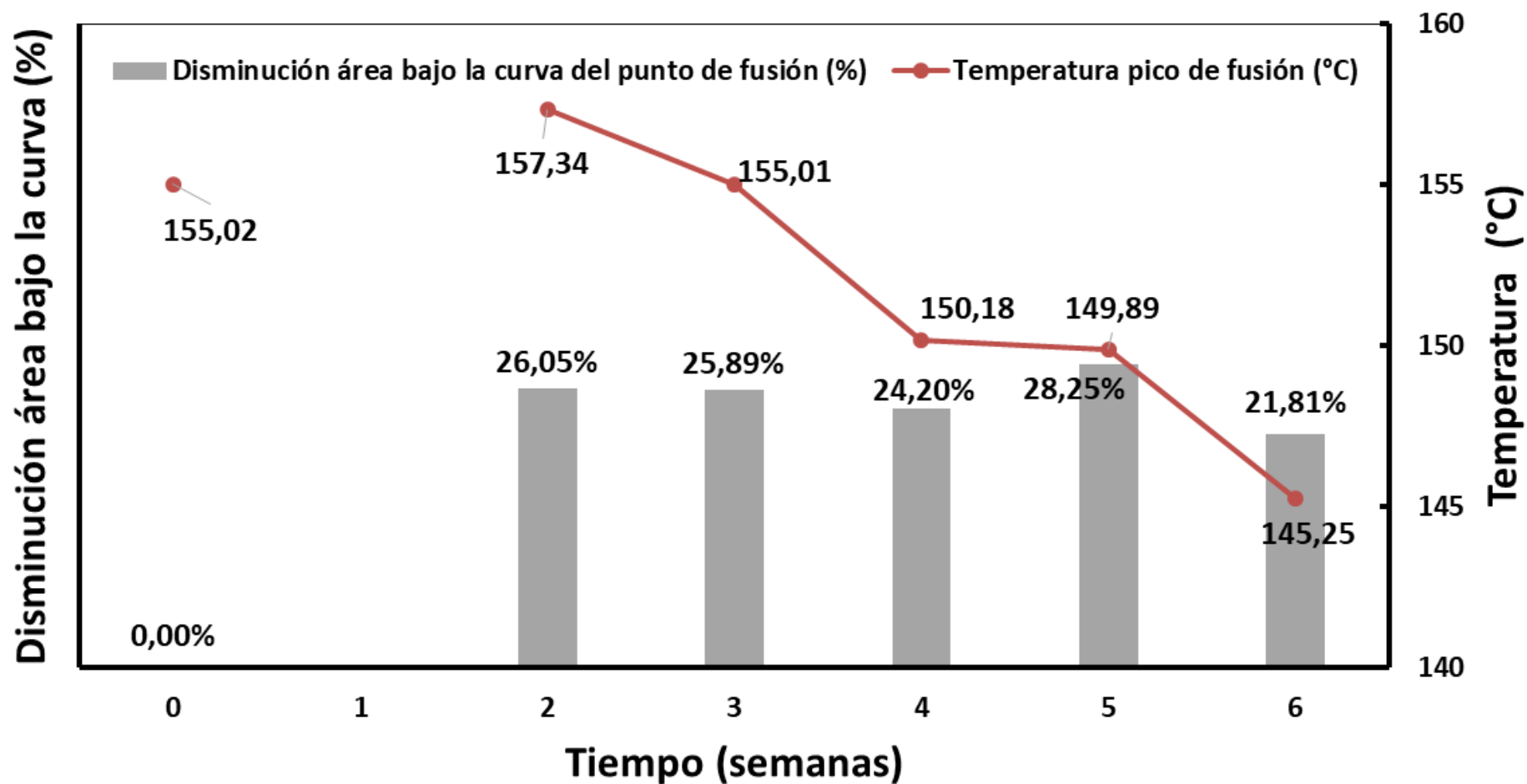
Variación en la transición vítrea del PLA de 40 µm de espesor en el compost sintético



Fuente: Elaboración propia

Figura 49

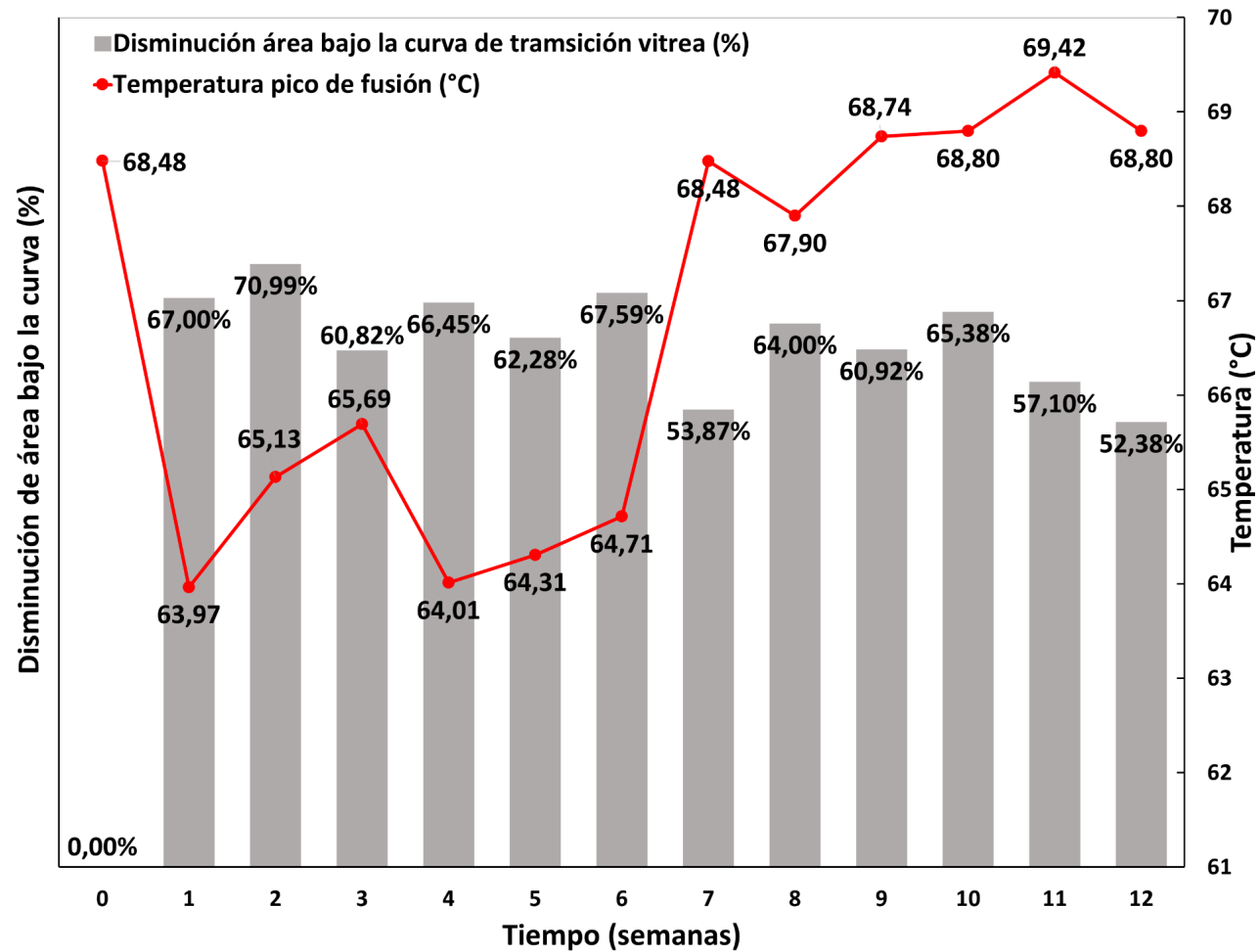
Variación en el punto de fusión del PLA de 40 µm de espesor en el compost sintético



Fuente: Elaboración propia

Figura 50

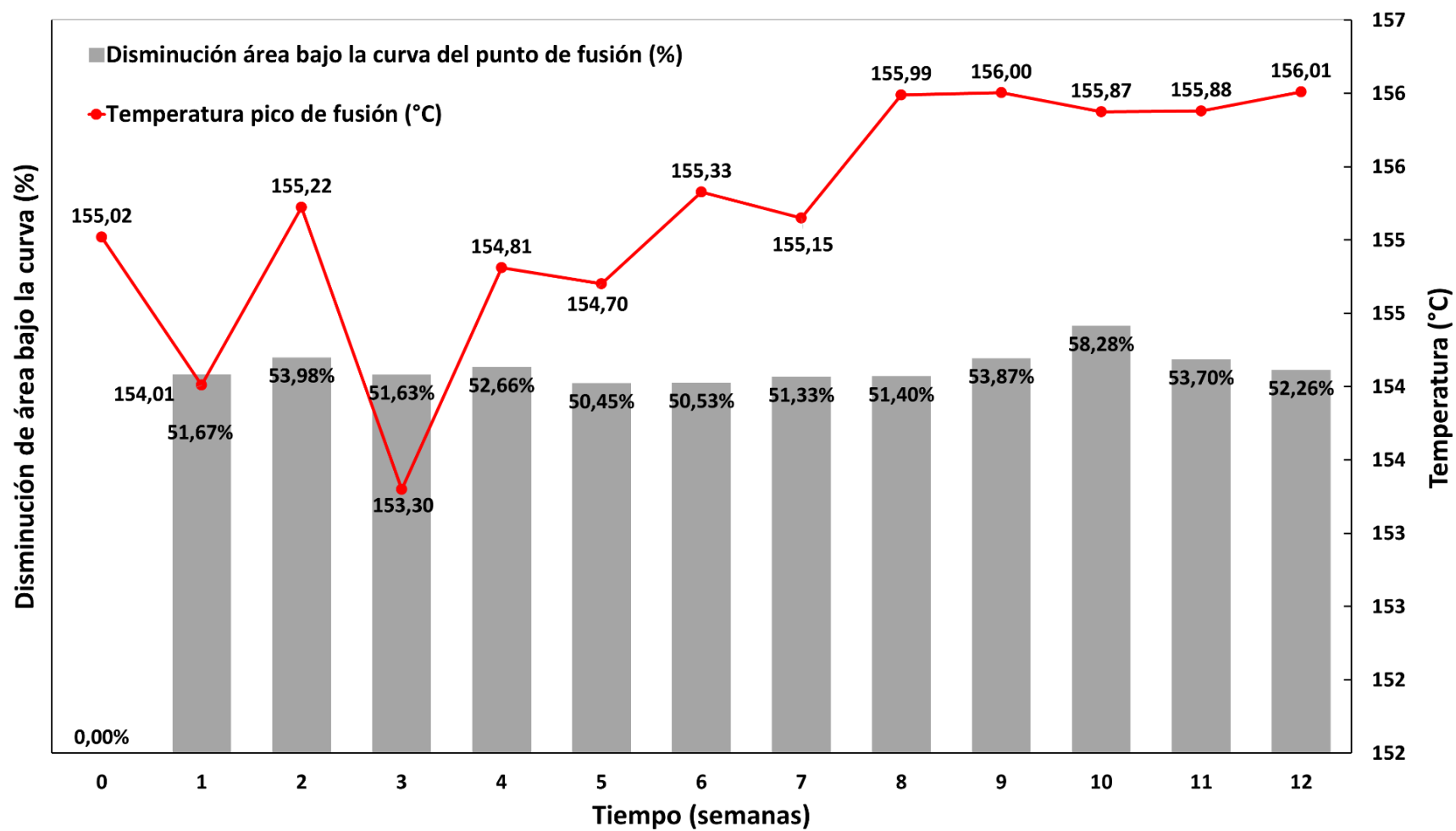
Variación en la transición vítrea del PLA de 40 µm de espesor dentro del compost Takakura



Fuente: Elaboración propia

Figura 51

Variación en el punto de fusión del PLA de 40 µm de espesor dentro del compost Takakura



Fuente: Elaboración propia

A diferencia de los estudios con PLA de 20 μm , Torrez (2023) y Segura (2023) reportaron una temperatura de transición vítrea (T_g) de 61 $^{\circ}\text{C}$ y una temperatura de fusión (T_m) de 152 $^{\circ}\text{C}$, mientras que el PLA de 40 μm presentó valores de $T_g = 64,38 \pm 1,85$ $^{\circ}\text{C}$ y $T_m = 155,02 \pm 0,29$ $^{\circ}\text{C}$. Al igual que en los resultados de Segura (2023), no se observaron cambios significativos en las T_m en los sistemas de compostaje artesanal. No obstante, el método Takakura mostró una reducción en la energía de degradación térmica (ΔH), lo que sugiere un indicio de biodegradación.

En los compostajes sintéticos, el PLA de 20 μm perdió su T_g a partir del día 11, y su T_m disminuyó a 148 $^{\circ}\text{C}$. En el presente estudio, el PLA de 40 μm perdió la T_g hasta la quinta semana y mostró una T_m de $145 \pm 3,93$ $^{\circ}\text{C}$ en la sexta semana. Esto indica que, si bien un mayor espesor retrasa el proceso de compostaje y aumenta la T_m y T_g iniciales, ambos materiales comparten la pérdida de T_g y tienden a estabilizar su T_m alrededor de los 148 $^{\circ}\text{C}$ justo antes de su degradación total.

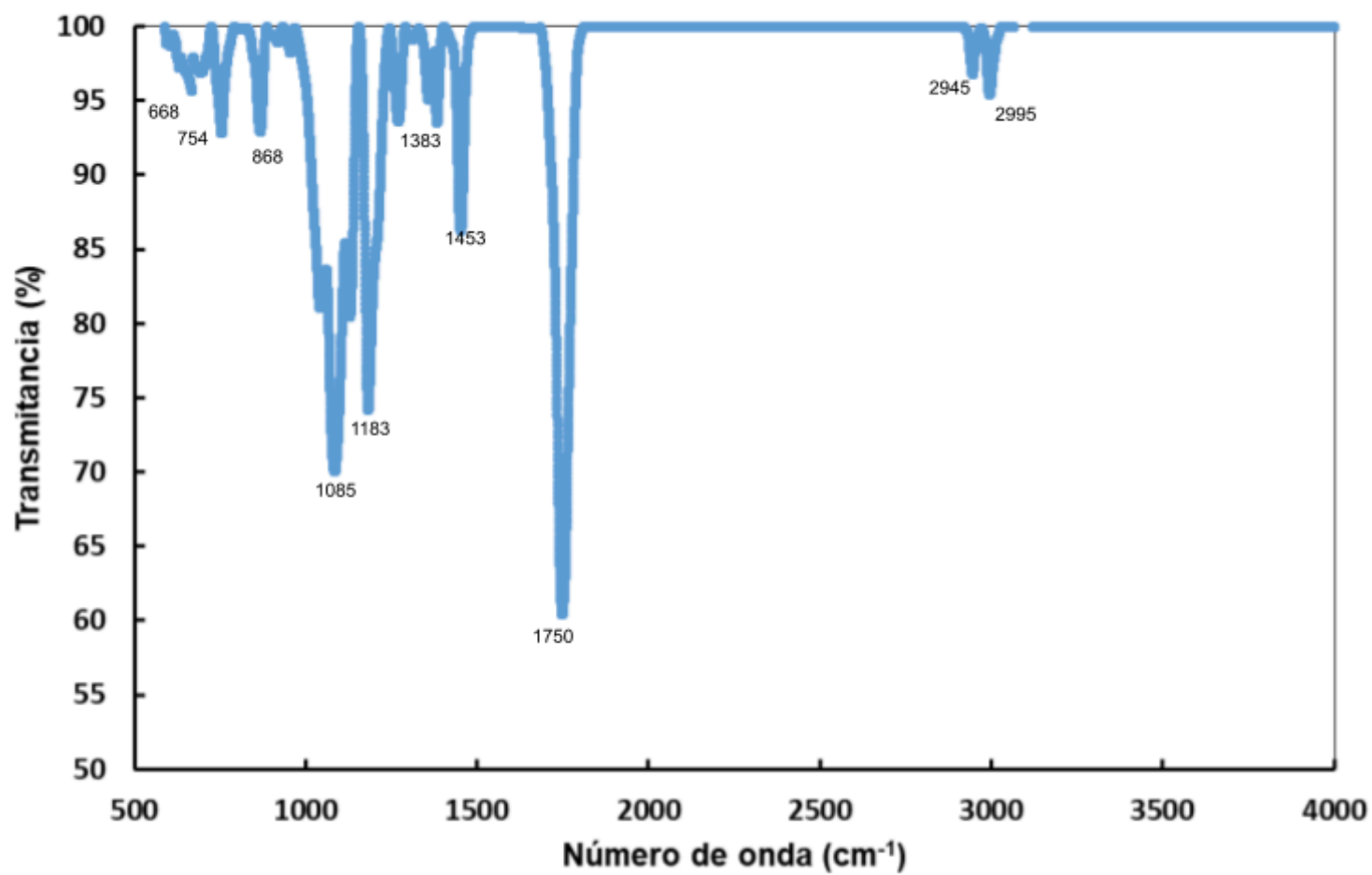
6.1.6.2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

A partir del espectro IR se detectan las características de vibración de los enlaces de los grupos funcionales de las moléculas. Estos absorben radiación infrarroja en una gama específica de número de onda, por ejemplo, el grupo CO (carbonilo) absorbe a 1700 cm^{-1} dando un pico intenso y agudo. Por lo tanto, al analizar cada una de las bandas de absorción se puede conocer la estructura química de la muestra analizada (Armelin-Diggroc et al., 2020).

Los resultados obtenidos del espectro infrarrojo del PLA de 40 μm de espesor, antes del compostaje (Figura 52), concuerdan con la caracterización de Murillo-Vargas et al. (2020). Este estudio detalla que las bandas a 2945 y 2995 cm^{-1} , correspondiente a la vibración longitudinal en los enlaces C-H presentes en los grupos metilo y en los carbonos terciarios (C-C) que forman la estructura del PLA. La banda a los 1748 cm^{-1} es debida a la vibración longitudinal del grupo carbonilo (C=O) presente en el PLA; además se observa que esta banda se encuentra a una longitud de onda mayor a la que presentaría un grupo carbonilo unido a cadenas de hidrocarburos (~ 1710 cm^{-1}). Esto se debe a que el PLA presenta grupos éster donde un oxígeno donador electrónico unido al grupo carbonilo hace el enlace C=O más fuerte y más rígido. La banda que se observa a los 1453 cm^{-1} es debida a las vibraciones de flexión entre enlaces C-H. Las bandas presentes a 1085 y 1383 cm^{-1} son debidas a vibraciones longitudinales de los enlaces C-C. La banda a 1183 cm^{-1} es una banda característica de todos los ésteres que representa las vibraciones longitudinales de los enlaces C-O. En la zona de huella digital las bandas a 668 cm^{-1} , 754 cm^{-1} y 868 cm^{-1} se deben a vibraciones de flexión por balanceo de los enlaces C-H.

Figura 52

Espectro infrarrojo del PLA de 40 μm de espesor antes del compostaje



Fuente: Elaboración propia

Armelin-Diggroc et al. (2020) explica que en la escala vertical de los espectros de IR se representa la transmitancia (T) [%] que es el cociente entre la intensidad que sale de la muestra y la intensidad del haz infrarrojo que incide sobre ella (I/I_0). Donde $I < I_0$, cuando el compuesto absorbe radiación. Cabe mencionar que, para usar el infrarrojo en un análisis cuantitativo se necesita relacionar la intensidad de luz absorbida con la cantidad de muestra que atraviesa la luz. Esta relación viene expresada mediante la Ley de Beer-Lambert que pone de manifiesto que la intensidad de luz absorbida (expresada como absorbancia) es proporcional a la cantidad de muestra atravesada. Para ello, se puede relacionar la T con la absorbancia (A) [unidades arbitrarias, u.a.], como se muestra en la Tabla 12, mediante las siguientes expresiones:

$$T = I/I_0 \quad [9]$$

$$A = -\lg T = \lg(1/T) \quad [10]$$

Tabla 12

Espectro infrarrojo del PLA de 40 μm de espesor antes del compostaje

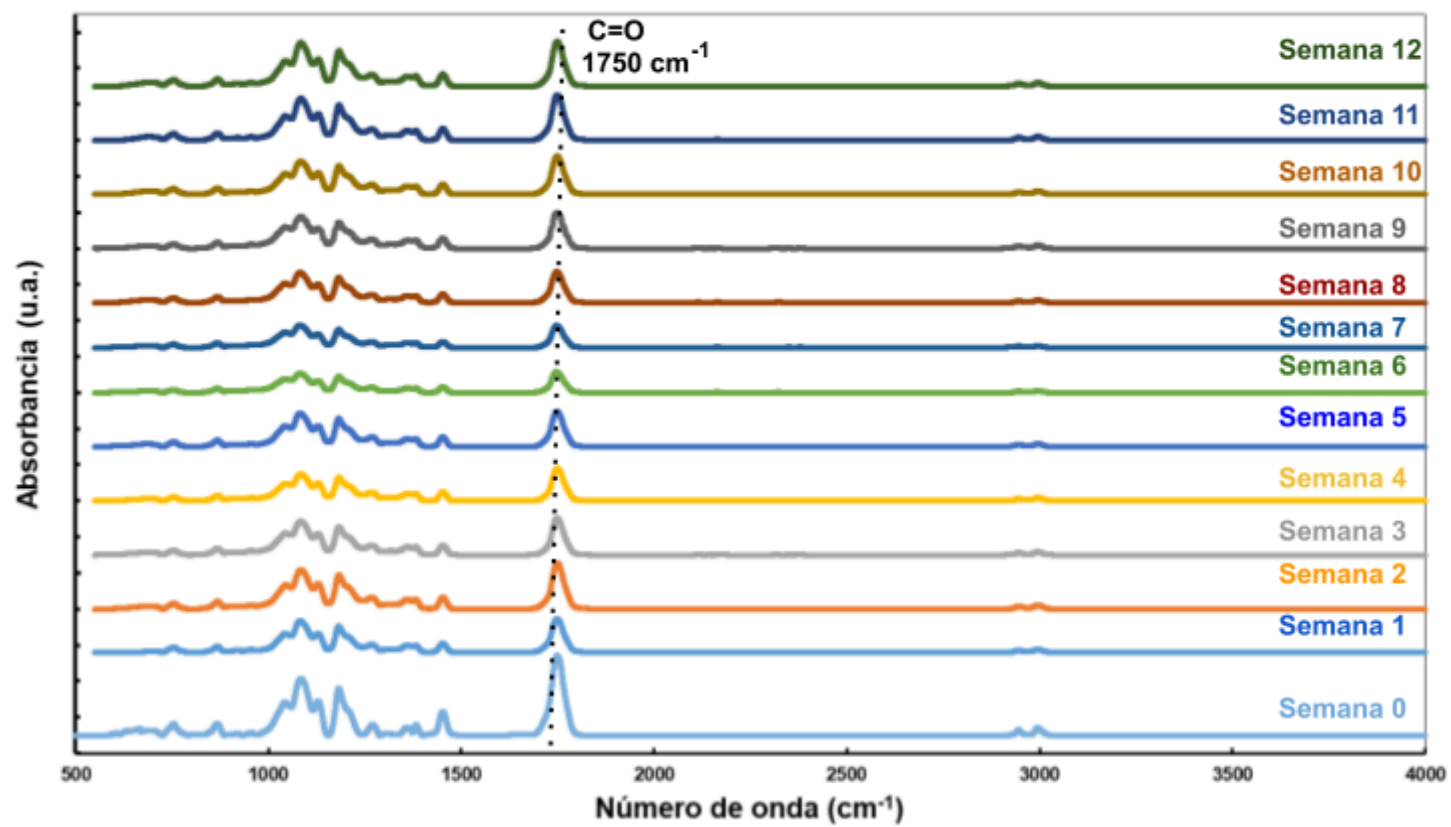
Componente	Vibración	Número de onda [cm^{-1}]	Transmitancia (T) [%]	Absorbancia (A) [u.a.]
CC (estructura PLA)	-	2995	95,44	0,02
C-H (grupo metilo)	Longitudinal	2945	96,84	0,01
C=O (grupo carbonilo)	Longitudinal	1748	59,89	0,22
C-H	Flexión	1453	86,39	0,06
C-C	Longitudinal	1383	92,66	0,03
		1085	70,19	0,15
C-O (ésteres)	Longitudinal	1183	74,19	0,13
C-H (balanceo)	Flexión	868	92,96	0,03
		754	92,85	0,03
		668	95,91	0,02

Fuente: Elaboración propia

El análisis de biodegradación mediante espectroscopía IR se basa en la disminución de la intensidad de absorción en longitudes de onda (A) específicas del material, lo que se traduce en un aumento del porcentaje de transmitancia ($T\%$), ya que son opuestas. En el caso del PLA, la banda característica se encuentra en 1748 cm^{-1} , correspondiente al grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) (Murillo-Vargas et al., 2020). La reducción de esta señal de A (u.a.) indica una alteración molecular del material, lo que sugiere el inicio de su degradación y genera variaciones en otras bandas del espectro. La Figura 53 presenta la variación del polímero semanalmente en el compostaje Takakura. Además, se muestra la disminución de la absorbancia en la Figura 54 y el incremento de la transmitancia en la Figura 55. La variación de A (u.a.) del PLA dentro del compost sintético se presenta en la Figura 56, su disminución en la Figura 57 y el aumento de la $T\%$ en la Figura 58. Cabe mencionar que a partir de la semana seis no se pudo recuperar muestras de los reactores sintéticos, por su nivel de degradación.

Figura 53

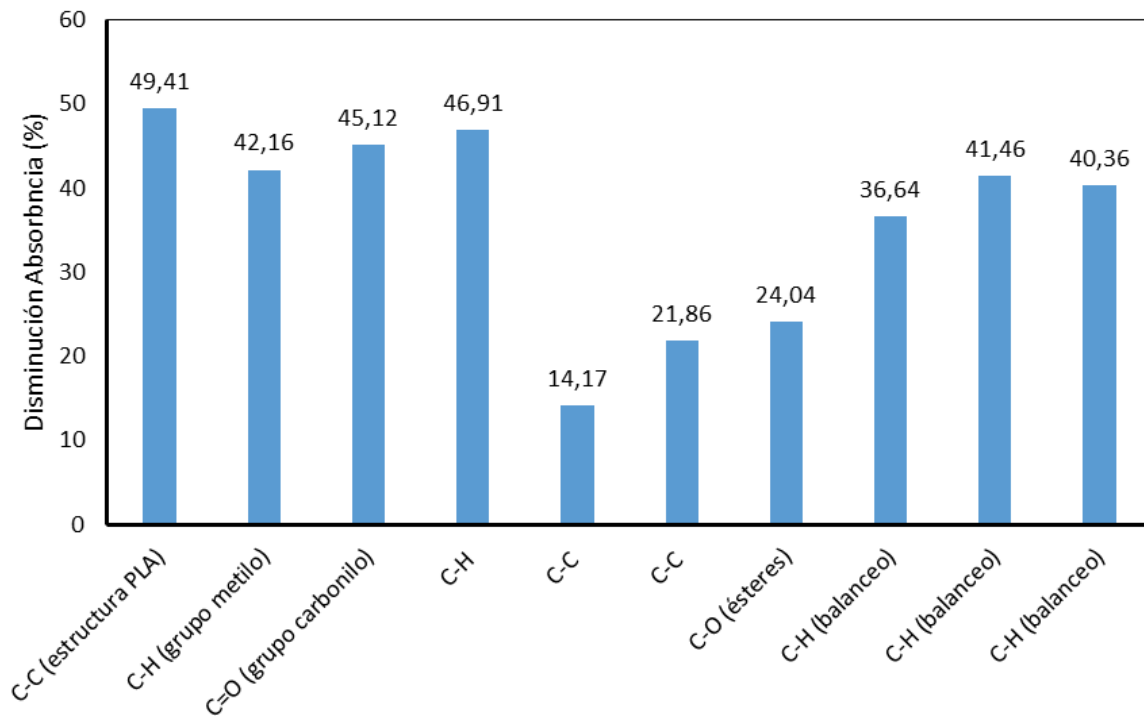
Variación de la absorbancia del PLA versus el número de onda en el compostaje Takakura



Fuente: Elaboración propia

Figura 54

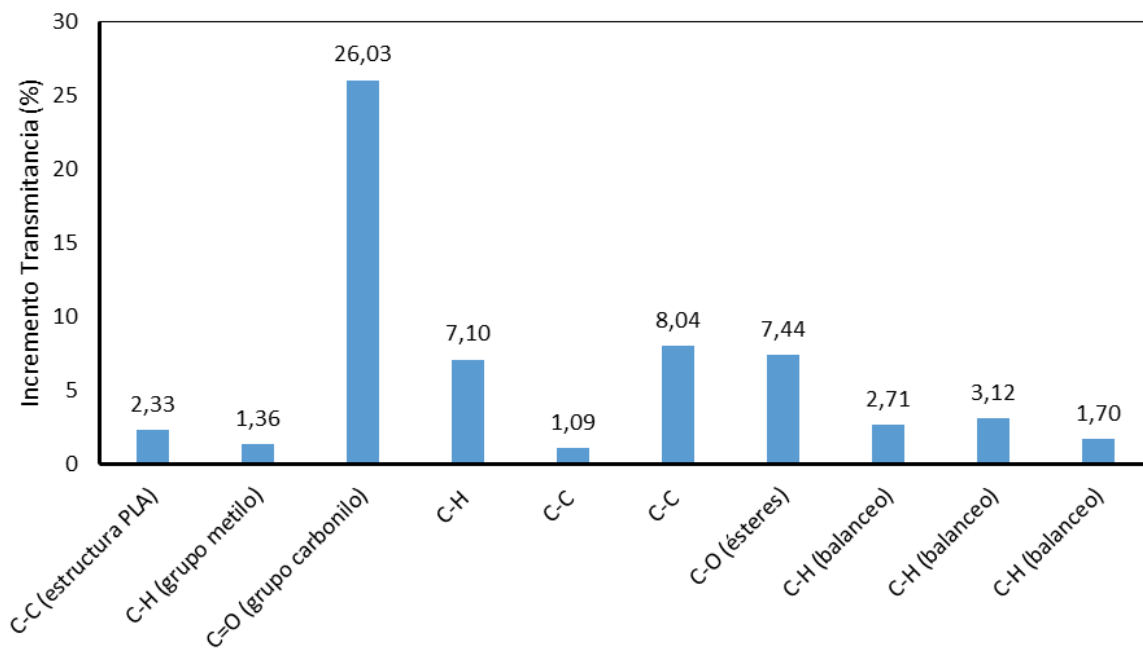
Absorbancia del PLA de 40 µm de espesor a las 12 semanas en el compostaje Takakura



Fuente: Elaboración propia

Figura 55

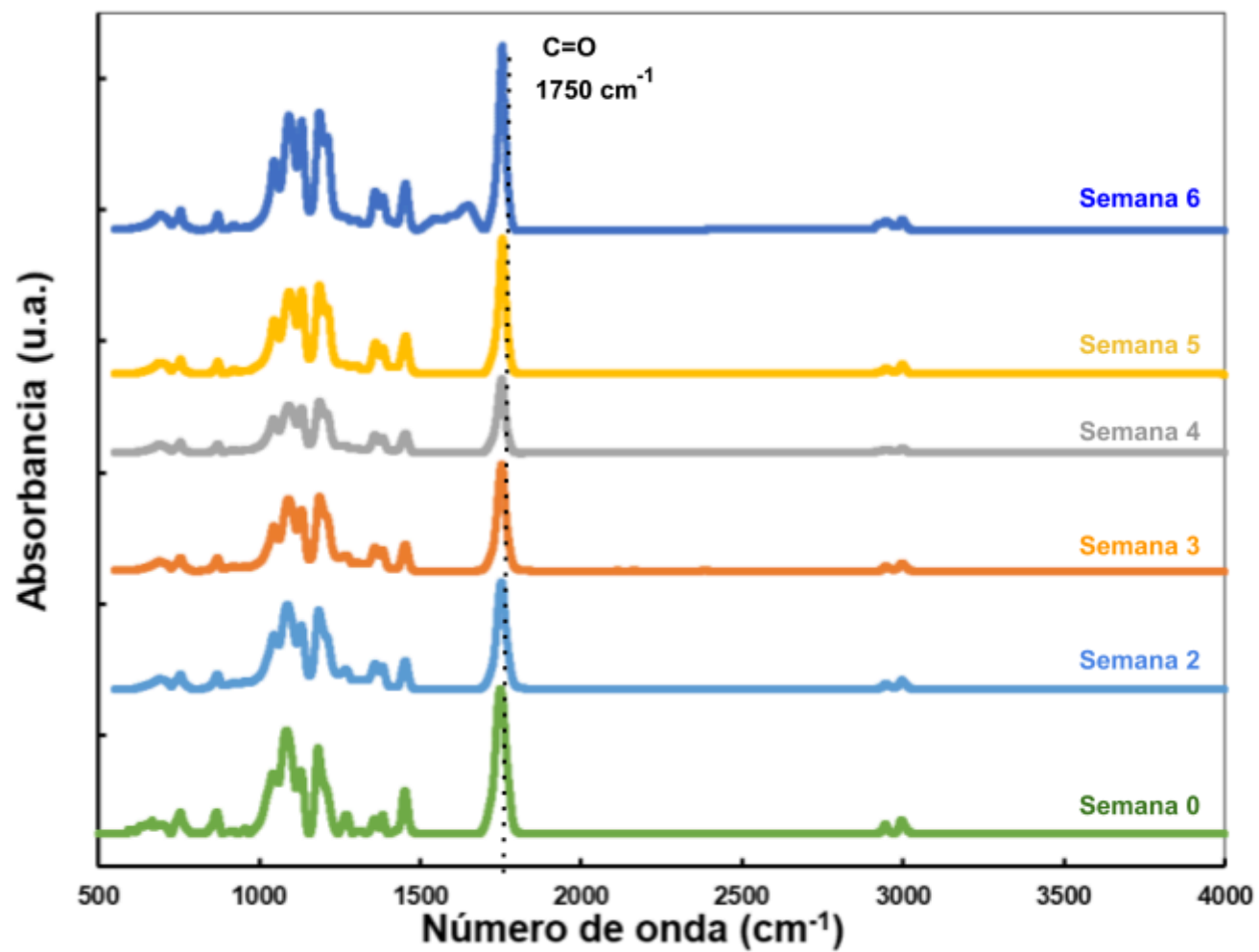
Transmitancia del PLA de 40 µm de espesor a las 12 semanas en el compostaje Takakura



Fuente: Elaboración propia

Figura 56

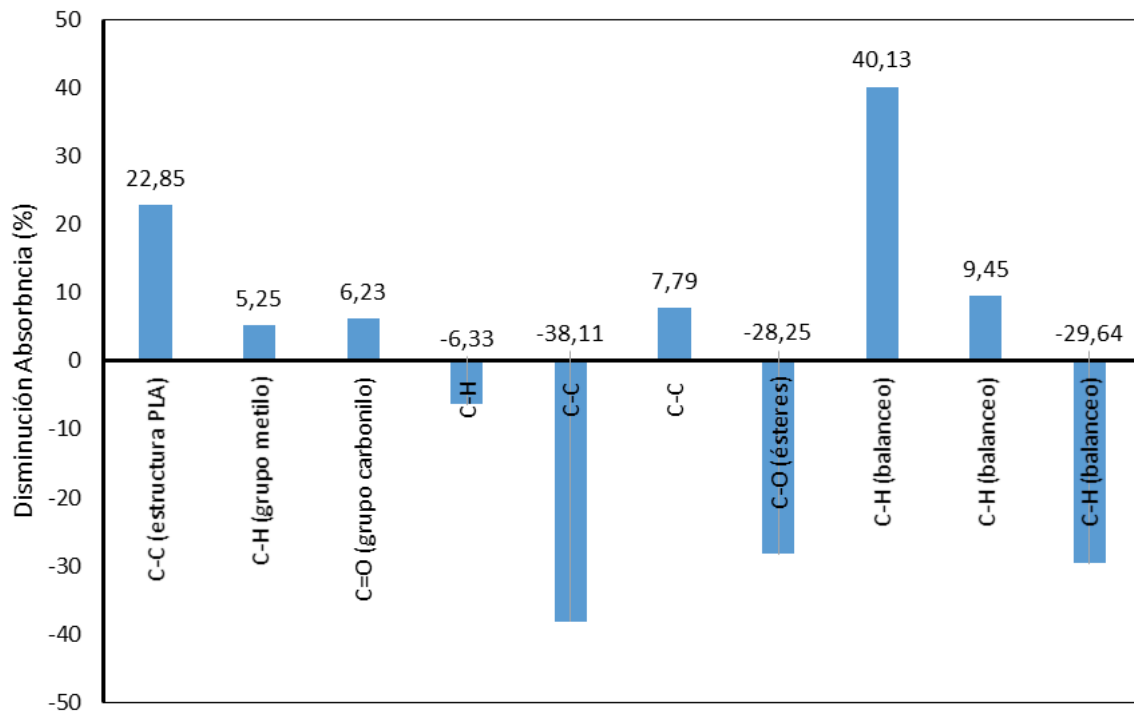
Variación de la absorbancia del PLA versus el número de onda en el compostaje sintético



Fuente: Elaboración propia

Figura 57

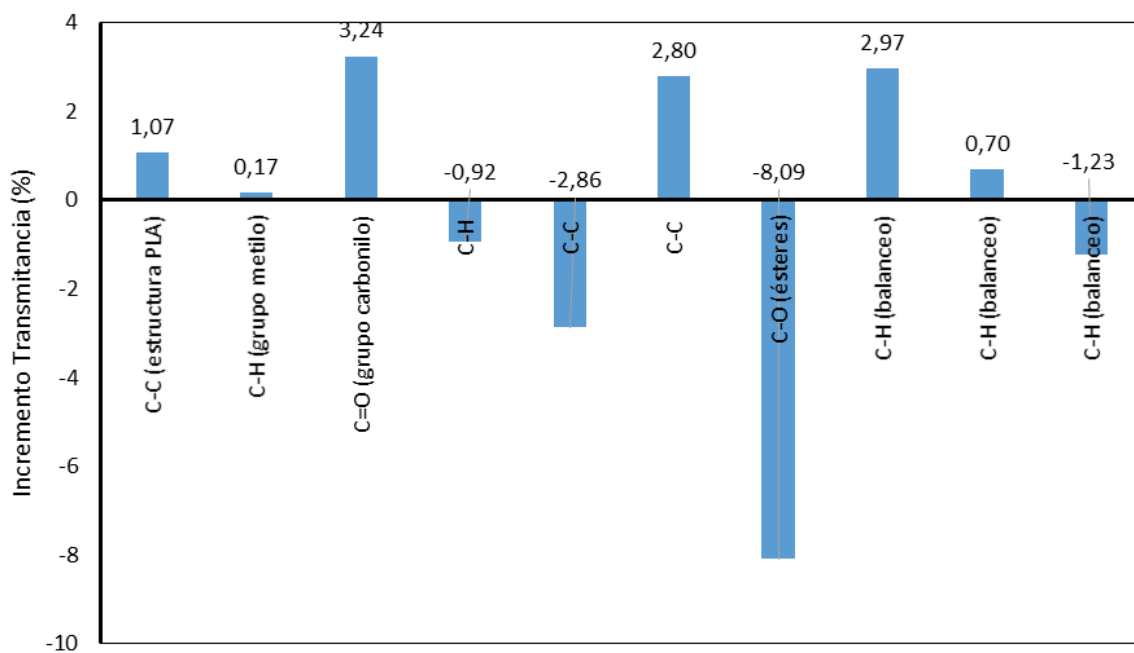
Absorbancia del PLA de 40 µm de espesor a las seis semanas en el compostaje sintético



Fuente: Elaboración propia

Figura 58

Transmitancia del PLA de 40 µm de espesor a las seis semanas en el compostaje sintético



Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 53 y 56 muestran una variación en la banda del grupo carbonilo ($C=O$) tanto en el compostaje Takakura como en el sintético, lo cual es un indicador relevante de la biodegradabilidad en los polímeros. En el compost Takakura, al final de la semana 12, se observa una disminución de 45,12 % en la absorbancia (Figura 54), mientras que en el compost sintético, esta disminución es de 6,23 % hacia la sexta semana (Figura 57).

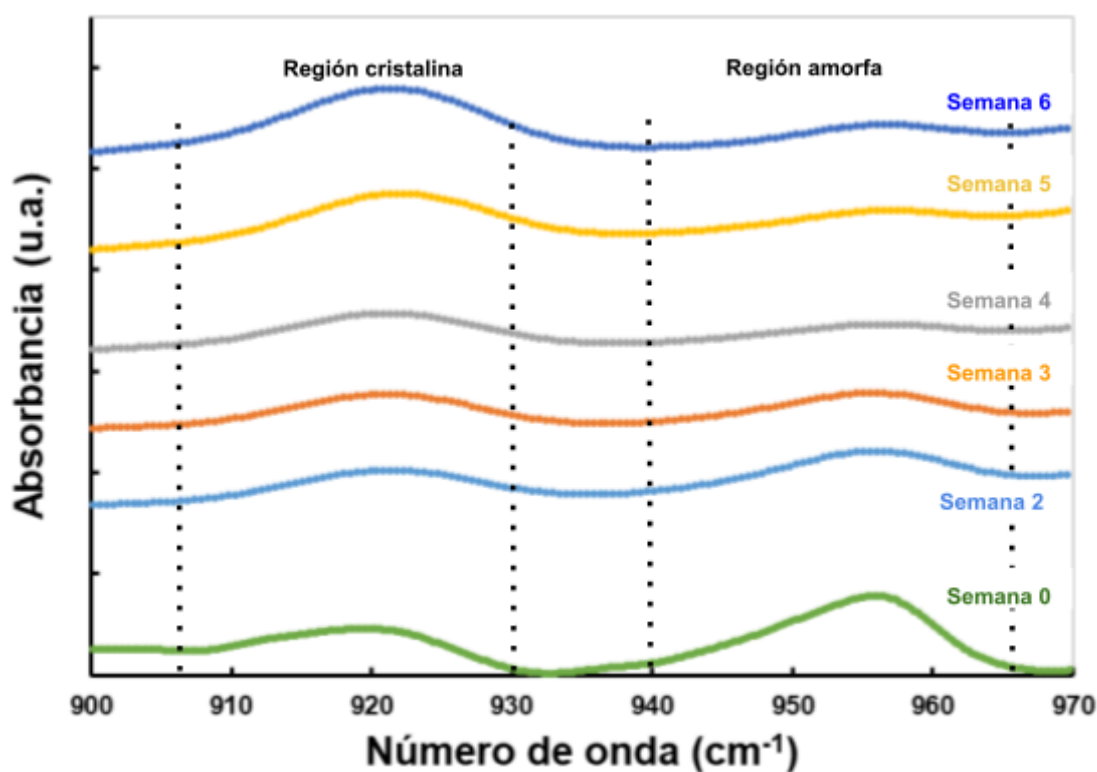
Durante el compostaje sintético, se observó que el polímero tendía a aglomerarse a medida que se desintegraba, lo que provocó una cristalización parcial y un aumento del espesor aparente en las muestras. Este fenómeno pudo haber afectado la medición del espectro IR, ya que los fragmentos más densos registran una mayor cantidad de grupos carbonilo en comparación con una muestra individual. En la Figura 56 se evidencia este comportamiento; la absorbancia en la banda del $C=O$ disminuye hasta la cuarta semana de compostaje, pero vuelve a aumentar a partir de la quinta semana, coincidiendo con la formación de aglomerados cristalizados.

En comparación con estudios previos, Torrez (2023) y Segura (2023) reportaron una absorbancia inicial del 35 % para la banda $C=O$ (1748 cm^{-1}) en empaques de PLA de $20\text{ }\mu\text{m}$. En el compostaje sintético, Torrez (2023) registró una absorbancia del 10,65 % al día 11; en sistemas tipo caja, esta fue del 12 %, y en sistemas rotatorios alcanzó el 29 % (Segura, 2023). En contraste, el PLA de $40\text{ }\mu\text{m}$ utilizado en este estudio mostró una absorbancia inicial del 40,11 % (0,223 u.a.), la cual disminuyó hasta 38,81 % en la sexta semana de compostaje sintético por la presencia de aglomerados, y a 22,01 % en el compostaje Takakura. Estos resultados sugieren una relación directa entre el espesor del material y la intensidad de absorbancia registrada.

La Figura 59, complementa este análisis al mostrar la evolución de las regiones amorfas (921 cm^{-1}) y cristalinas (957 cm^{-1}) del PLA de $40\text{ }\mu\text{m}$ en el compostaje sintético. Según Giełdowska et al. (2022), el PLA pierde primero sus regiones amorfas durante la degradación, lo que se manifiesta como una disminución en la intensidad del pico a 957 cm^{-1} . Este proceso favorece el reordenamiento molecular y el aumento de la cristalinidad, visible como un incremento en el pico a 921 cm^{-1} . La formación de cristales más grandes y densos puede unir fragmentos cercanos, especialmente si estos están parcialmente fundidos por el calor y la humedad presentes en el sistema de compostaje.

Figura 59

Evolución de las regiones amorfas (921 cm^{-1}) y cristalinas (957 cm^{-1}) del PLA de $40\text{ }\mu\text{m}$ en el compostaje sintético

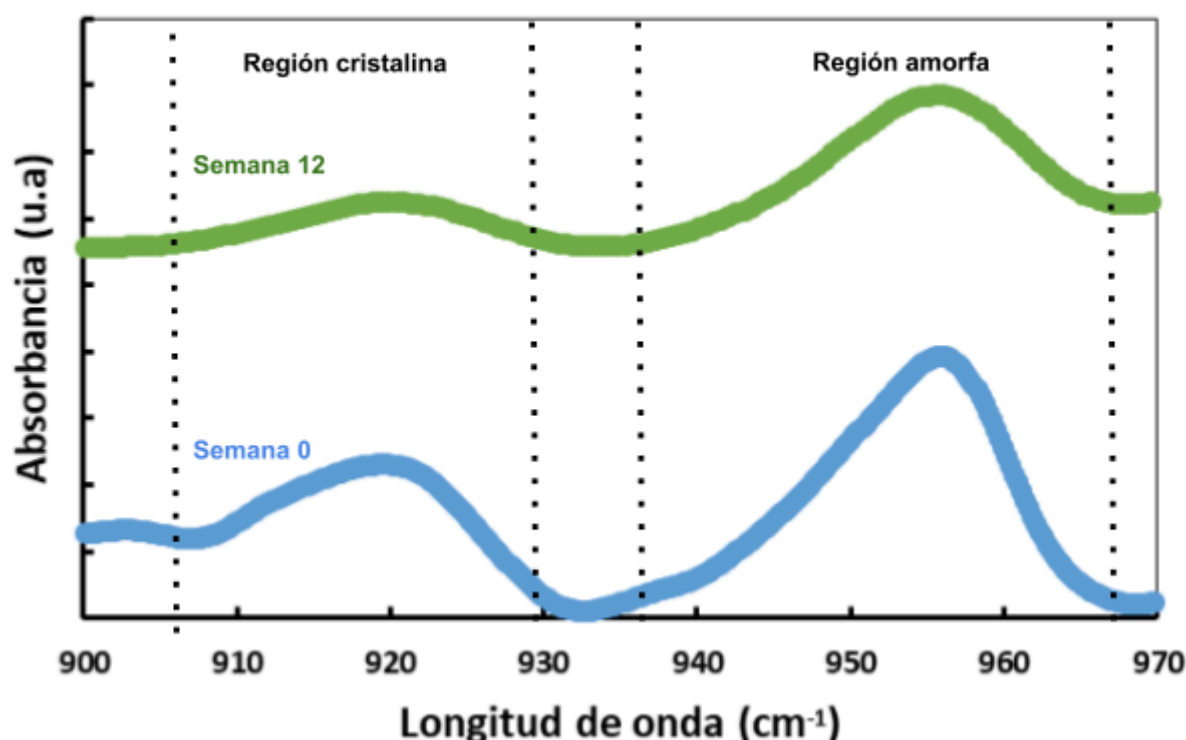


Fuente: Elaboración propia

En el compostaje Takakura (Figura 60), aunque no se observó visualmente la cristalización del PLA ni la formación de aglomerados, el espectro IR evidenció una disminución en la absorbancia de la región amorfa en la semana 12, lo que indica el inicio de la degradación y un posible proceso de cristalización. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Trofimchuk et al. (2023), quienes también reportaron la cristalización del PLA en sistemas de compostaje artesanal.

Figura 60

Variación de las regiones amorfas (921 cm^{-1}) y cristalinas (957 cm^{-1}) del PLA de $40\text{ }\mu\text{m}$ en el compostaje Takakura en la semana 12



Fuente: Elaboración propia

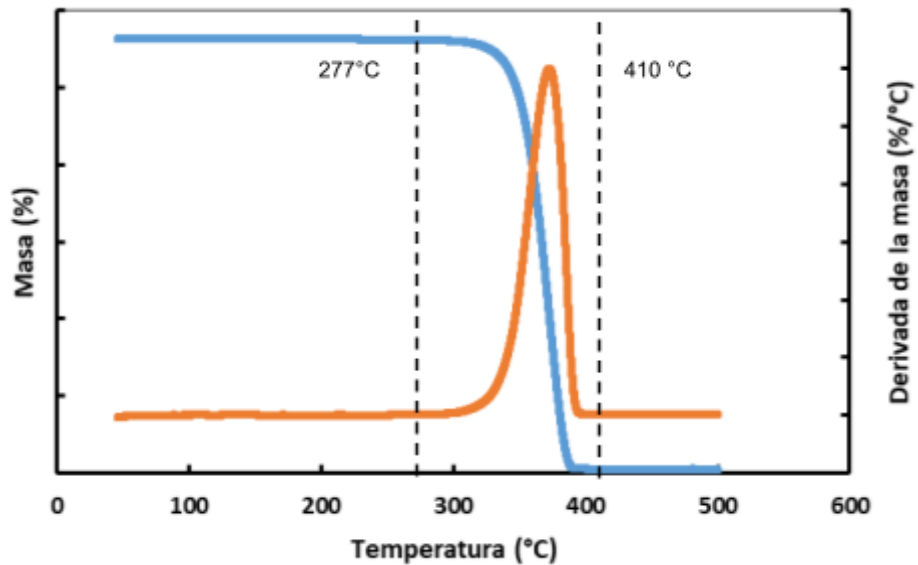
En conclusión, el PLA mostró signos de degradación tanto en el compostaje sintético como en el artesanal. En el compost sintético, aunque la cristalización entre fragmentos afectó temporalmente los análisis por espectroscopía IR, este fenómeno sólo persistió durante un par de semanas antes de que el material comenzara su degradación completa. En cambio, en el compost Takakura no se observó visualmente cristalización, probablemente porque no se alcanzaron las condiciones térmicas necesarias para iniciar la hidrólisis del material ($55\text{ }^{\circ}\text{C}$), sin embargo se evidenciaron cambios en la región amorfa.

6.1.6.3. Análisis termogravimétrico (TGA)

Para la caracterización inicial de la primera muestra, primero se había definido una rampa térmica de $10,00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta $800,00\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, el polímero se desintegra a $\sim 500,00\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por lo tanto, se decide bajar el rampage térmico a esta temperatura para la segunda y tercera muestra; y trabajar con los promedios, considerando los datos de la primera repetición hasta $500,00\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tanto en la curva termogravimétrica (masa %) como en la de su derivada ($\%/^{\circ}\text{C}$) de la Figura 61, el polímero sufre un evento de desintegración térmica. Este es un indicador de que está compuesto por solo un material; el cual inicia en la semana cero (antes del compostaje), a una temperatura de $\sim 277,21 \pm 12,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ y termina a $410,93 \pm 7,23\text{ }^{\circ}\text{C}$, perdiendo el $98,79 \pm 0,75\%$ de su masa inicial que equivale a $5,57 \pm 0,19\text{ mg}$. Cabe mencionar que la temperatura que produce la mayor pérdida de masa se presenta a $372,44 \pm 0,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ que corresponde a una tasa de $3,00 \pm 0,10\text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Al final del proceso, se recolecta $0,02 \pm 0,04\text{ mg}$ o $0,37 \pm 0,64\%$ de su masa inicial, considerada como ceniza.

Figura 61

Análisis termogravimétrico para la caracterización inicial del PLA antes del compostaje

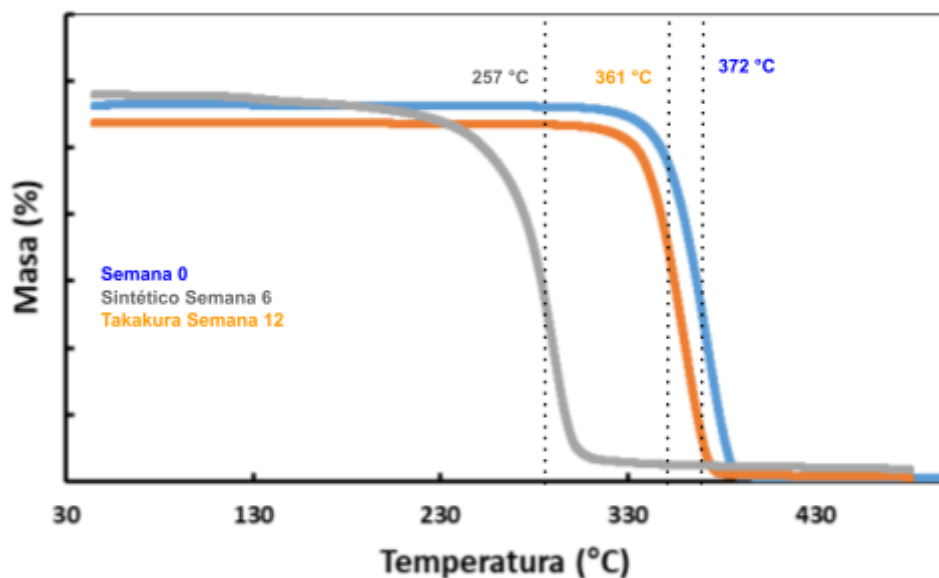


Fuente: Elaboración propia

En comparación con estudios previos, Segura (2023) y Torrez (2023) identificaron ambos en sus trabajos que el PLA de 20 μm presenta su temperatura crítica a 356 °C antes del compostaje. En esta investigación, el PLA de 40 μm presentó una temperatura crítica de 372 °C (Figura 62), lo que sugiere que un mayor espesor del polímero incrementa su resistencia a la degradación térmica.

Figura 62

Análisis termogravimétrico del PLA a través del tiempo en el compost sintético y Takakura la última semana de muestreo



Fuente: Elaboración propia

Al finalizar el compostaje, Segura (2023) observó que la temperatura crítica disminuyó a 342 °C en cajas de compostaje y a 291 °C en los sistemas rotatorios. Por su parte, Torrez (2023) registró una temperatura crítica de 287,8 °C al día 11 en el compostaje sintético. Estos datos, al igual que los obtenidos en esta investigación, evidencian una reducción progresiva en la temperatura crítica del PLA que es un indicador de su degradación.

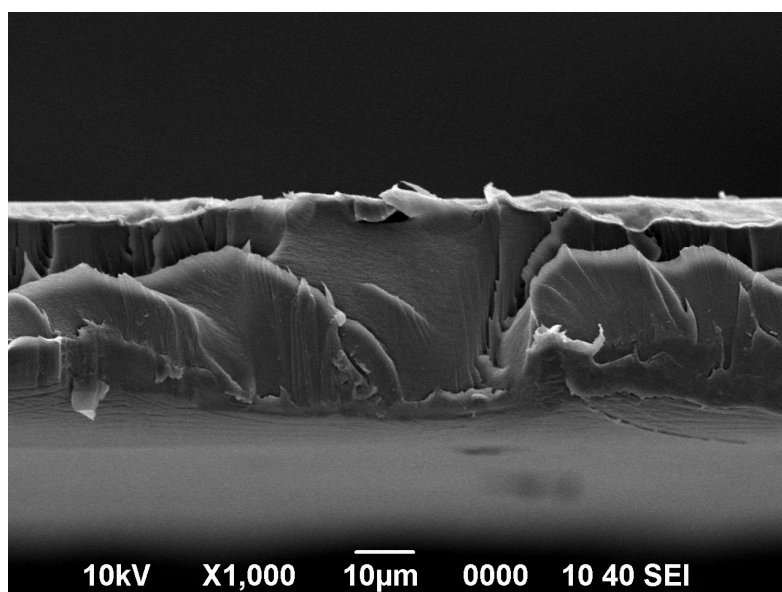
En el presente estudio, el PLA en compostaje Takakura pasó de 372 a 361 °C en 12 semanas (reducción de ~ 2,96 %), mientras que en el compost sintético descendió a 257 °C en seis semanas (reducción de 30,91 %). La disminución fue más leve en el compostaje Takakura, probablemente porque no se alcanzaron las condiciones necesarias para favorecer la hidrólisis del material. Sin embargo, los resultados siguen indicando una degradación de PLA. Los Apéndices 2 y 3 muestran el comportamiento del polímero a lo largo de las semanas de compostaje en cada tipo de compost.

6.1.6.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se ajustó el amperaje, se creó un vacío dentro del microscopio. Los análisis se hicieron por duplicado, con un amperaje de 20 mA y 180 s; además, se ajustó el voltaje medio a 10 kV, ya que los materiales orgánicos trabajan en un rango de 5 a 15 kV. Como se puede apreciar en las Figuras 63 y 64, el empaque presenta heterogeneidad en la estructura, ya que se observan algunos puntos blancos dispersos en la superficie. Se comunicó vía correo electrónico con el dueño de la empresa que proporciona los empaques para consultarle si existe algún otro material dentro de la composición del empaque que no se había reportado al inicio de la investigación. La respuesta fue que se desconoce el origen de estos resultados; por lo que se establece comunicación con los proveedores del polímero y de los empaques. Al final del proceso, se brindaron documentos donde se justifica que el empaque está elaborado en su totalidad por PLA. Este resultado se corrobora con los resultados del TGA que presentan sólo una pérdida másica. Sin embargo, aún se desconoce qué son los puntos observados en el SEM.

Figura 63

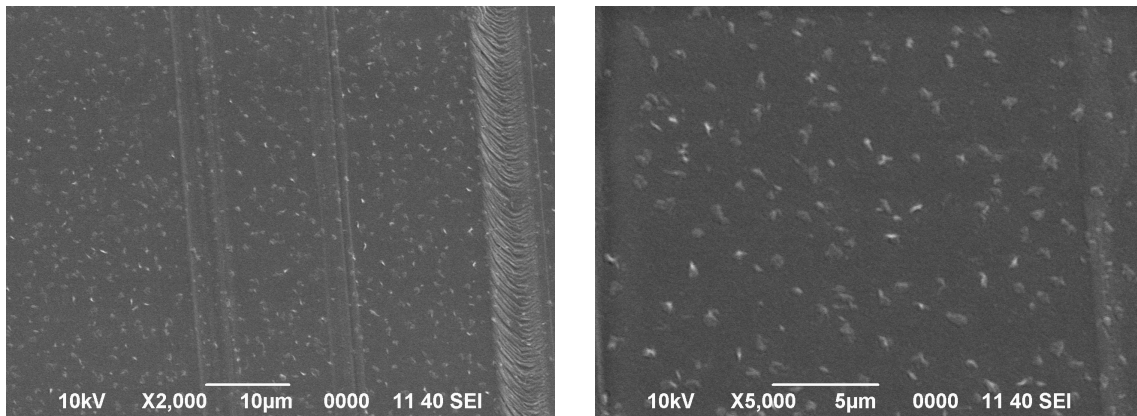
Imagen lateral de SEM para la caracterización del espesor del PLA de 40 µm antes del compostaje



Fuente: Elaboración propia

Figura 64

Imagen de SEM de la vista frontal para analizar la uniformidad y homogeneidad para la caracterización del PLA de 40 μm antes del compostaje

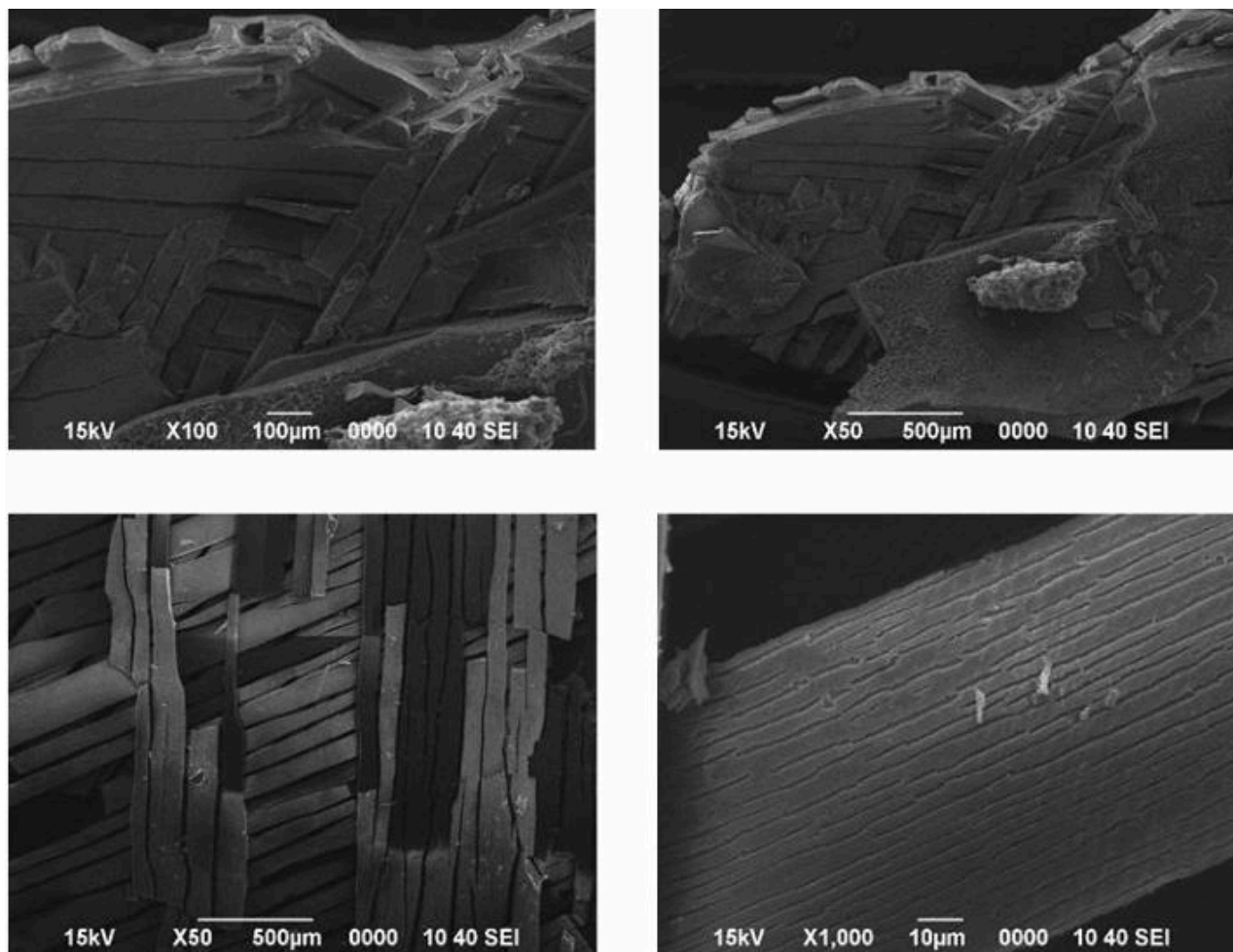


Fuente: Elaboración propia

El polímero presenta fracturas en su estructura luego de seis semanas en el compostaje sintético (Figura 65). Esta es una señal de desintegración. Por otro lado, el PLA de 40 μm al final del proceso de compostaje artesanal (12 semanas) aún se conserva intacto. Sin embargo, en la Figura 66 se puede apreciar que el polímero empieza a presentar fracturas (grietas), así como pandeos en su estructura, señal de que se presenta una pérdida de sus propiedades físico mecánicas y de biodegradación.

Figura 65

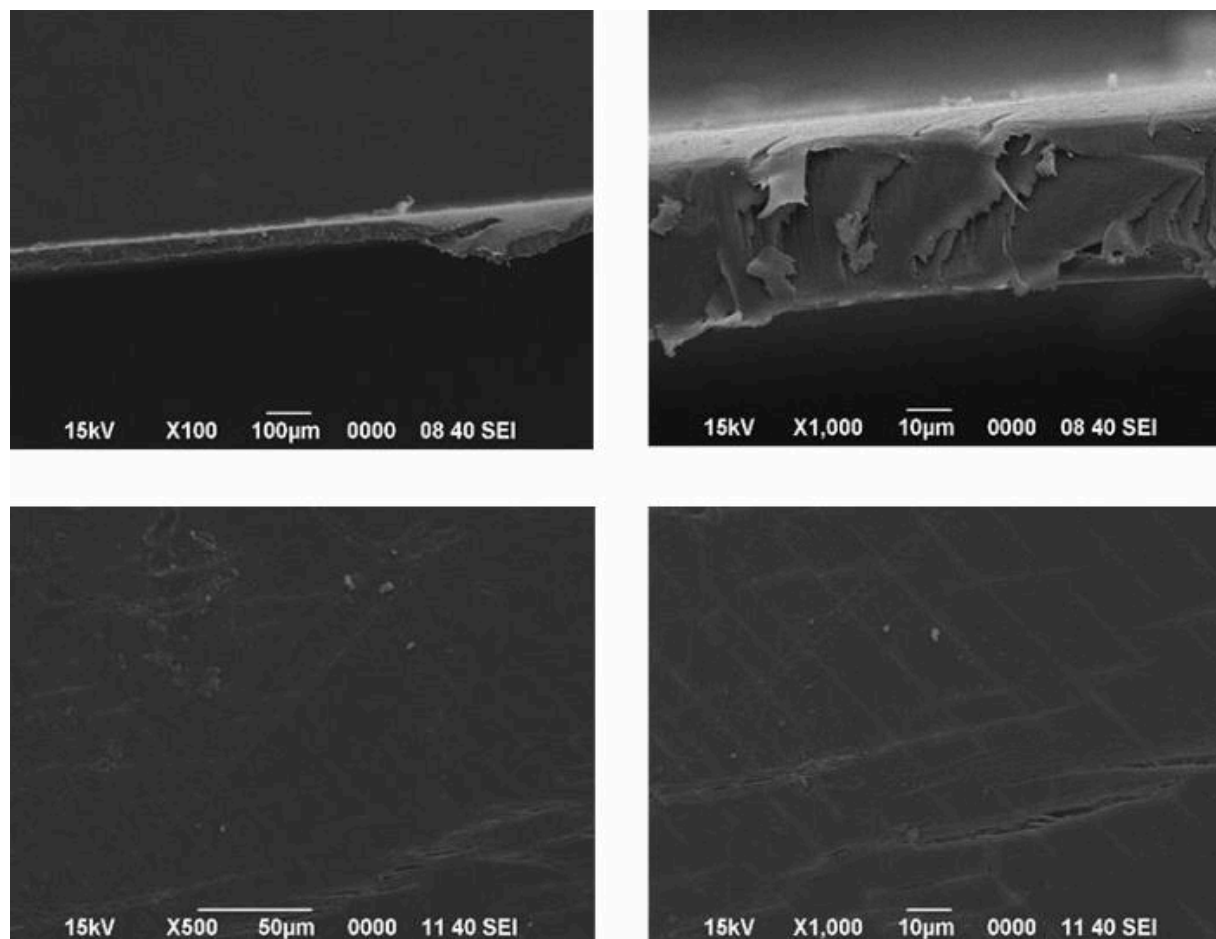
Imágenes de SEM del PLA de 40 μm después de seis semanas en el compost sintético



Fuente: Elaboración propia

Figura 66

Imágenes de SEM del PLA de 40 μm después del proceso de compostaje artesanal (Takakura)



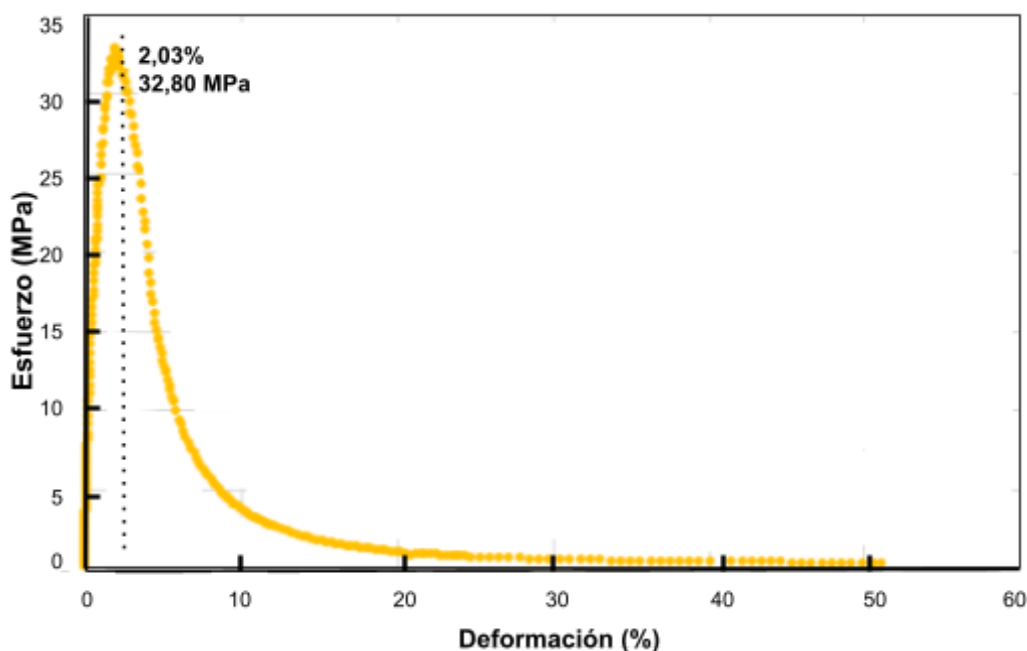
Fuente: Elaboración propia

6.1.6.5. Análisis Mecánico Dinámico (DMTA)

Se obtuvieron los valores de las fuerzas de ruptura (MPa) y deformación (%). La Figura 67 ilustra que el polímero tiene un comportamiento dúctil ante la deformación y presenta un esfuerzo máximo de 32,80 MPa cuando se ha deformado ~ 2,03 %; alcanzando la ruptura al deformarse ~ 51,21 %, . Estos resultados corresponden a un análisis que se hizo por triplicado.

Figura 67

DMTA del PLA de 40 μ m previo al compostaje



Fuente: Elaboración propia

Durante el compostaje no fue posible realizar más pruebas de caracterización. Esto debido a la falta de uniformidad en las muestras, lo que limitó la obtención de resultados objetivos. Además, se presentaron problemas de mantenimiento en el equipo al final del proceso, sin embargo, por medio de los análisis sensoriales se concluye que el polímero sometido al compost sintético se volvió frágil. Por otro lado, el PLA en el Takakura si bien presenta una disminución en sus propiedades físico mecánicas, este conservó sus propiedades dúctiles.

La reducción de sólidos volátiles indicó que ambos compostajes alcanzaron la madurez necesaria para ser utilizados como abono. Además, las inspecciones sensoriales confirmaron que todas las enmiendas eran saludables, ya que no se detectaron lixiviados, malos olores ni presencia de plagas. En cuanto a la caracterización del PLA a lo largo del compostaje, los análisis realizados (FTIR, DSC, TGA, SEM y DMTA) evidenciaron una pérdida de sus propiedades fisicomecánicas tanto en el compost sintético como en el Takakura. No obstante, el porcentaje de degradación del empaque (D %) fue de 4,41 % en el compost Takakura, mientras que en el compost sintético alcanzó el 100 %. Por lo tanto, según el plazo de 90 días establecido por la norma ISO 20:2000, se puede afirmar que el PLA de 40 μ m es biodegradable bajo condiciones controladas (58 ± 2 °C), pero no lo es en condiciones de compostaje Takakura a temperatura ambiente para el mismo periodo de evaluación.

6.2. Análisis de abonos orgánicos

Los resultados corresponden a un análisis de la influencia de la degradación del PLA en la composición de dos tipos de compost mediante un estudio de abonos orgánicos en condiciones de laboratorio. Se evaluó el efecto de la degradación del polímero en la composición química final del compost sintético (comercial) y Takakura (artesanal) resultantes. Las evaluaciones de los abonos orgánicos se analizaron conforme lo establecido por la norma chilena del Instituto Nacional de Normalización (INN) “NCh2880 Norma Chilena Oficial. Compost Clasificación y requisito.”; y los resultados de Huamán (2019), Sullivan et al. (2018), Román et al. (2013) y Castro et al. (2023). El análisis estadístico consistió en determinar si los datos recolectados tenían una distribución normal y homogeneidad en sus varianzas. Seguido se realizaron pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y Dunn ($\alpha = 0,05$) para identificar si existen diferencias significativas entre los compostajes.

6.2.1. Evaluación de los análisis de abonos orgánicos

Como se puede apreciar en la Tabla 13, el contenido de N (% masa) disminuyó al final del compostaje, mientras que el C (% masa) se mantuvo casi constante, tanto para el compostaje control como el que contenía el PLA. Esto permitió un aumento en la relación C/N de aproximadamente 15. Según Castro et al. (2023) una óptima relación C/N ofrece un sustrato energético propicio para el desarrollo de poblaciones microbianas y los procesos complejos de descomposición que estas llevan a cabo. Se recomienda que las matrices tengan una relación entre 20 - 40 al inicio del compostaje. Sin embargo, un compost maduro debe mantener una relación entre 10 - 15. Este abono cercano a 15 tiene mayor beneficio, ya que aporta más contenido energético para la actividad de los microorganismos. Por otro lado, en la Tabla 14 se puede apreciar como el compostaje artesanal presentó un aumento en el N (% masa) y una constancia en el C (% masa), generando una disminución en la relación C/N. Las bajas relaciones C/N obtenidas se deben en parte a la baja relación C/N con la que se inició el proceso de compostaje.

Tabla 13

Análisis de abonos orgánicos del compost sintético obtenido en condiciones de laboratorio

Parámetro	Compost sintético			Criterio de evaluación	
	Inicial	Control final	Mezcla con PLA final	Criterio	Norma
N (% masa)	3,13 ± 0,01	2,67 ± 0,14	2,66 ± 0,00	≥ 0,50	(INN, 2005)
P (% masa)	0,36 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,44 ± 0 01	~ 0,50	(Huamán, 2019)
Ca (% masa)	0,81 ± 0,03	0,95 ± 0,01	0,96 ± 0,01	> 1	(INN, 2005)
Mg (% masa)	0,23 ± 0,00	0,26 ± 0,00	0,27 ± 0,00	0,25 - 0,70	(Sullivan et. al., 2018)
K (% masa)	0,84 ± 0,01	1,02 ± 0,01	1,06 ± 0,01	> 1	(INN, 2005)
S (% masa)	0,21 ± 0,00	0,24 ± 0,01	0,24 ± 0,01	≥ 0,25	(Sullivan et. al., 2018)
Fe (mg/kg)	6646 ± 11,31*	7140 ± 321,73*	8082 ± 258,80*	> 200	(INN, 2005)
Cu (mg/kg)	154,00 ± 0,00*	186,00 ± 4,24*	190,00 ± 1,40*	> 20	(INN, 2005)
Zn (mg/kg)	122,00 ± 3,53*	150,00 ± 0,71*	149,00 ± 0,00*	> 20	(INN, 2005)
Mn (mg/kg)	156,00 ± 6,36*	170,00 ± 0,71*	180,00 ± 3,53*	> 100	(INN, 2005)
B (mg/kg)	13,00 ± 0,00*	17,00 ± 0,00*	16,00 ± 0,71*	> 100	(INN, 2005)
HUM (%)	13,00 ± 0,00	63,00 ± 0,00	66,00 ± 0,71	30 - 40	(Román et. al. 2013)
pH (H ₂ O)	6,49 ± 0,13	7,13 ± 0,92	7,71 ± 0,77	5 - 8,5	(INN, 2005)
C (% masa)	41,56 ± 0,38	40,99 ± 0,06	40,67 ± 0,36	-	-
CE (mS/cm)	7,80 ± 0,00	8,00 ± 0,00	6,20 ± 0,00	8 ≥	(INN, 2005)
C/N (Relación)	13,30 ± 0,00	15,40 ± 0,07	15,30 ± 0,14	10-15	(Castro et. al, 2023)

Nota: Todos los análisis se hicieron por duplicado. *Valores con * no cumplen con el criterio de evaluación. Fuente:* Elaboración propia.

Tabla 14

Análisis de abonos orgánicos del compost Takakura obtenido en condiciones de laboratorio

Parámetro	Compostaje Takakura			Criterio de evaluación	
	Inicial	Control final	Mezcla con PLA final	Criterio	Norma
N (% masa)	2,29 ± 0,06	2,82 ± 0,04	2,64 ± 0,01	≥ 0,50	(INN, 2005)
P (% masa)	1,32 ± 0,14	0,73 ± 0,00	0,67 ± 0,00	~ 0,50	(Huamán, 2019)
Ca (% masa)	2,25 ± 0,21	1,98 ± 0,04	1,89 ± 0,00	> 1	(INN, 2005)
Mg (% masa)	0,86 ± 0,09	0,53 ± 0,01	0,52 ± 0,01	0,25 - 0,70	(Sullivan et. al., 2018)
K (% masa)	1,07 ± 0,10	3,25 ± 0,08	3,19 ± 0,01	> 1	(INN, 2005)
S (% masa)	0,26 ± 0,03	0,32 ± 0,00	0,29 ± 0,00	≥ 0,25	(Sullivan et. al., 2018)
Fe (mg/kg)	16898 ± 1636,25*	19660 ± 1155,41*	20308 ± 95,46*	> 200	(INN, 2005)
Cu (mg/kg)	69,00 ± 11,31*	61,00 ± 3,54*	60,50 ± 0,71*	> 20	(INN, 2005)
Zn (mg/kg)	149,50 ± 20,51*	138,00 ± 4,24*	136,50 ± 2,12*	> 20	(INN, 2005)
Mn (mg/kg)	475,50 ± 58,69*	434,00 ± 16,97*	456,50 ± 2,12*	> 100	(INN, 2005)
B (mg/kg)	15,00 ± 1,41*	29,00 ± 1,41*	27,00 ± 1,40*	> 100	(INN, 2005)
HUM (%)	11,00 ± 0,00	29,50 ± 0,71	40,00 ± 0,00	30 - 40	(Román et. al. 2013)
pH (H ₂ O)	6,71 ± 0,19	7,78 ± 0,30	7,82 ± 0,38	5 - 8,5	(INN, 2005)
C (% masa)	24,85 ± 0,89	24,97 ± 0,01	23,52 ± 0,23	-	-
CE (mS/cm)	7,00 ± 0,00	20,80 ± 0,00*	25,80 ± 0,00*	8 ≥	(INN, 2005)
C/N (Relación)	10,85 ± 0,07	8,90 ± 0,14	8,90 ± 0,00	10-15	(Castro et. al, 2023)

Nota: Todos los análisis se hicieron por duplicado. Valores con * no cumplen con el criterio de evaluación. Fuente: Elaboración propia.

Acosta et al. (2019) y Castro et al. (2023), explican que las relaciones C/N muy bajas conllevan a pérdidas de N en forma de amoníaco debido a la falta de estructuras de C que puedan retenerlo, ya que se afecta el proceso de mineralización del C. Sin embargo, durante el proceso de compostaje tanto el compost sintético como el Takakura tuvieron buena aireación y no se identificaron malos olores, este es un indicador de que el nitrógeno no se estaba perdiendo excesivamente en forma de amoníaco. Por otro lado, el compost sintético recibió hidratación durante 12 semanas, mientras que el Takakura fue alimentado con residuos orgánicos. Estos resultados se ven reflejados en las Tablas 13 y 14 con la disminución del N (% masa) en compost sintético y el aumento en el Takakura. Este resultado pudo provocar que no se alcanzara un equilibrio y cambio entre las fases de compostaje significativo en el compostaje Takakura como si se alcanzó en el sintético, ocasionando una caída en la relación C/N por la constante de mineralización del N.

El P es el segundo nutriente más importante para la nutrición vegetal, pero a diferencia del N es menos disponible (Beltrán et al., 2020). Si bien el compost sintético tuvo un leve aumento del P (% masa), en el Takakura disminuyó; sin embargo, los valores se encuentran dentro de lo recomendado (Huamán, 2019). Por su parte, los valores de K (% masa) incrementaron en ambos tipos de compost y también se encuentran en rangos óptimos (INN, 2005). El K^+ es un macroelemento que desempeña un papel importante en las plantas, en la apertura estomática donde las células se abren con la acumulación del K^+ y se cierran con su pérdida. Además, contribuye a mantener niveles altos de turgencia a través de la retención de agua en las células, participa en la activación de enzimas en la fotosíntesis, así como en la calidad de los cultivos (Beltrán et al., 2020).

Con respecto a la concentración de las bases (Ca y Mg), Beltrán et al. (2020) explica que estas tienen relación con las condiciones de descomposición del material orgánico. Para el compostaje sintético se presentó un aumento en comparación con el compost inicial, mientras que el compost Takakura tuvo una disminución. En contraste con las referencias, los valores de Mg (% masa) se encuentran en los parámetros recomendados por Sullivan et al. (2018), para ambos tipos de compost. Por otro lado, los valores de Ca (% masa) en el compost Takakura se consideran adecuados y si bien en el compost sintético estos están por debajo de 1 %, la diferencia no supera el 5 %.

El aumento de las bases (Ca y Mg) sugiere cambios en la composición relativa de los sustratos originales y la síntesis de nuevos compuestos como producto de los procesos de descomposición y síntesis del material (Castro et al., 2023). Esto puede deberse a que el compost sintético solamente fue hidratado durante 12 semanas; por esta razón la cantidad de materia orgánica se mantuvo constante en sus reactores. Las composteras artesanales se alimentaron periódicamente con nuevos residuos; en consecuencia los microorganismos no tuvieron tiempo suficiente para terminar de descomponer dicha materia.

Las concentraciones de elementos menores como (Cu, Mn, Fe, Zn y B), Castro et al. (2023) explica que si se encuentran muy por encima de ámbitos considerados óptimos, pueden provocar toxicidades para el crecimiento de plantas al momento de aplicar estos abonos a los suelos agrícolas. En este sentido, los abonos resultantes de todos los tratamientos obtenidos en la presente investigación presentan valores de Fe (mg/kg), Cu (mg/kg), Zn (mg/kg) y Mn (mg/kg) tóxicos para el desarrollo de los cultivos.

Por otro lado, los valores del micronutriente B (mg/kg) se encuentran por debajo de los valores recomendados por la INN (2005) tanto para el compostaje sintético como para el Takakura. Inostroza y Gonzalez (2020) explican que la deficiencia de B causa efectos negativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas, el rendimiento y la calidad de los cultivos. El mismo autor indica que a nivel morfológico, su deficiencia puede generar una reducción del alargamiento de la raíz, expansión de la hoja, pérdida de fertilidad y una inhibición en el crecimiento de los órganos, como la punta de la raíz, brotes, hojas jóvenes, flores y frutos. Debido a lo anterior, se recomienda el uso de estos abonos en sistemas de fertirrigación o en horticultura con aplicación al suelo (Ministerio de la Presidencia de España, 2013).

Con respecto al contenido de humedad, al final del compostaje, los reactores Takakura se encontraban dentro de los parámetros recomendados, siendo un indicador de una correcta aireación y mezclado durante el proceso. Sin embargo, los reactores sintéticos estaban por encima del 40 %. Esto se debe a que las muestras recolectadas para los análisis de suelo se encontraban recién hidratadas según el cronograma estipulado por la Norma ISO 20200:2004.

Los valores de pH para todos los tratamientos se encontraban en el ámbito recomendado. Estos valores no proliferan la biodigestión anaeróbica y la liberación adicional de ácidos orgánicos (López et al., 2017). Por su parte, la conductividad eléctrica en el compost sintético se encuentra dentro de los valores recomendados; mientras que en compostaje Takakura los superó. Este indicador es de importancia. El efecto en el suelo y las plantas es significativo después de su aplicación debido al alto contenido de sales en la capa activa (López et al., 2017). Una CE baja facilita el manejo de la fertilización y evita problemas por fitotoxicidad en los cultivos (Beltrán et al., 2020).

Con base a lo anterior, se determina que los abonos procedentes de todos los compostajes, se clasifican como *Abono Clase B*. Esta categoría se asigna a los productos de nivel intermedio de calidad, que presentan algunas restricciones para su uso. Puede ser aplicado a macetas y requiere ser mezclado con otros elementos adecuados (García Céspedes et. al, 2014).

6.2.2. Análisis estadístico de abonos orgánicos

La normalidad de los resultados se evaluó por medio de una prueba de Shapiro-Wilk, estableciendo $\alpha = 0,05$. Se obtuvo un *valor de p* ≈ 1 para todos los valores con *desviación estándar* (*s*) diferente a cero y resultados indefinidos en aquellos con una *s* = 0; con excepción del pH. Esto significa que los resultados se ajustan perfectamente a una distribución normal. Sin embargo, el *valor p* si bien no se basa específicamente en el promedio y la desviación estándar de un conjunto de datos, el tamaño de la muestra puede afectar directamente su resultado. En este caso, al realizar los análisis por duplicado se disminuyó la sensibilidad de la prueba (muestras pequeñas, *n* = 2) y no fue posible detectar desviaciones de la normalidad. Cabe mencionar que las mediciones de pH se hicieron por triplicado y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15

Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) del pH para los diferentes compost

Variable	Sintético inicial	Sintético control	Sintético PLA	Takakura inicial	Takakura control	Takakura PLA
Valor W	0,94	0,87	0,98	0,77	0,91	0,95
Valor p	0,69	0,26	0,95	0,04	0,45	0,72
Normalidad	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, todos los compostajes presentaron un *valor p* $> 0,05$ en su pH, con excepción del Takakura inicial. Adicionalmente, se obtuvo un *valor W* en la prueba de Shapiro-Wilk para cada compostaje. Este valor, tiene que ser ~ 1 para aceptar la hipótesis nula y designar una distribución normal. Sin embargo, el *valor W* del compostaje Takakura inicial es de 0,768 lo cual se puede considerar significativamente menor a la unidad en comparación con los demás tratamientos que estuvieron en $\sim 0,9$.

Con respecto a la evaluación de la *Homogeneidad de Varianza* (Tabla 16) se obtuvo para todas las pruebas de Fligner-Killeen valores $p > 0,05$, por lo que no se rechazaría la hipótesis nula y se podría considerar que las varianzas son homogéneas y se cumple dicho requisito para la aplicación de una ANOVA. Sin embargo, se generó ambigüedad con los resultados de P (% masa), Ca (% masa), Mg (% masa), S (% masa), Mn (mg/kg) y HUM (%), que tienen valores $p < 0,05$ en la prueba de Levene. Además, la sensibilidad de la prueba de Shapiro-Wilk se comprometió y un valor igual a la unidad no es certeza de una distribución normal para estos conjuntos de datos. El parámetro que no cumple con dicha condición es el pH. Por lo tanto, se establece que no es posible evaluar estadísticamente los resultados por medio de la prueba paramétrica ANOVA, ya que no se tiene información suficiente y no es posible aplicar de manera confiable dicho análisis. De esta forma, se decide analizar a través de Kruskal-Wallis todos los parámetros, como se aprecia en la Tabla 17; ya que no asume normalidad.

Tabla 16

Prueba de Homogeneidad de Varianza ($\alpha = 0,05$) para los Análisis de Suelos de los compost sintéticos y Takakura

Variable	Levene	Fligner-Killeen
N (% masa)	0,137	0,289
P (% masa)	0,028	0,187
Ca (% masa)	0,043	0,262
Mg (% masa)	0,031	0,119
K (% masa)	0,082	0,438
S (% masa)	0,045	0,120
Fe (mg/kg)	0,091	0,405
Cu (mg/kg)	0,084	0,260
Zn (mg/kg)	0,050	0,260
Mn (mg/kg)	0,048	0,405
B (mg/kg)	0,191	0,203
HUM	0,046	0,084
C (% masa)	0,155	0,406
C/N (Relación)	0,165	0,199
pH (H ₂ O)	0,083	0,200

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17

Prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) para los Análisis de Suelos de los compost sintéticos y Takakura

Variable	Valor H	χ^2	Diferencia significativa
N (% masa)	16,32	0,0056	Sí
P (% masa)	16,58	0,0051	Sí
Ca (% masa)	16,48	0,0054	Sí
Mg (% masa)	16,48	0,0051	Sí
K (% masa)	15,05	0,0101	Sí
S (% masa)	15,90	0,0064	Sí
Fe (mg/kg)	16,16	0,0064	Sí
Cu (mg/kg)	15,44	0,0083	Sí
Zn (mg/kg)	12,26	0,0289	Sí
Mn (mg/kg)	15,68	0,0078	Sí
B (mg/kg)	16,10	0,0059	Sí
HUM (%)	16,58	0,0048	Sí
C (% masa)	16,16	0,0064	Sí
C/N (Relación)	15,68	0,0070	Sí
pH (H ₂ O)	18,31	0,0026	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Por medio de una evaluación no paramétrica se determinó que todos los parámetros de los análisis de suelos presentan diferencia significativa entre los tipos de compost ($\chi^2 < 0,05$). Por lo que se realizan más análisis para determinar si existe diferencia significativa entre los mismos tipos de compostaje (Tabla 18). Donde se identificó que para las enmiendas sintéticas no presenta diferencia significativa la relación C/N. Por otro lado, en el compostaje Takakura, se abstrae que no son significativamente diferentes los micronutrientes: Fe (mg/kg), Cu (mg/kg), Mn (mg/kg) y Zn (mg/kg); así como la relación C/N y el C (% masa).

Tabla 18

Prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) para los Análisis de Suelos según tipo de compost

Variable	Compost sintético			Compost Takakura		
	Valor H	χ^2	Diferencia significativa	Valor H	χ^2	Diferencia significativa
N (% masa)	6,20	0,0400	Sí	7,20	0,0273	Sí
P (% masa)	7,20	0,0273	Sí	7,20	0,0211	Sí
Ca (% masa)	6,82	0,0321	Sí	7,20	0,0241	Sí
Mg (% masa)	7,20	0,0183	Sí	6,82	0,0321	Sí
K (% masa)	7,20	0,0273	Sí	6,20	0,0450	Sí
S (% masa)	6,82	0,0285	Sí	7,20	0,0211	Sí
Fe (mg/kg)	7,20	0,0273	Sí	5,60	0,0608	No
Cu (mg/kg)	6,82	0,0285	Sí	3,27	0,1926	No
Zn (mg/kg)	6,20	0,0340	Sí	1,267	0,516	No
Mn (mg/kg)	7,20	0,0273	Sí	3,80	0,1472	No
B (mg/kg)	6,20	0,0299	Sí	6,82	0,0321	Sí
HUM (%)	7,20	0,0211	Sí	7,20	0,0211	Sí
C (% masa)	7,20	0,0273	Sí	5,60	0,0608	No
C/N (Relación)	5,60	0,0525	No	5,40	0,0526	No
pH (H ₂ O)	7,42	0,0244	Sí	9,62	0,0079	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se realiza una prueba post hoc no paramétrica de comparación múltiple de Dunn con corrección de Bonferroni ($\alpha = 0,05$), ya que el análisis de Kruskal-Wallis, por sí solo, no permite identificar entre los tratamientos específicos que existen diferencias significativas. A partir de ello, se elabora un mapa de calor de significancia estadística donde se puede visualizar el nivel de diferencias significativas que se presentaron entre los compostajes. Además, se registran diferencias significativas que no fueron evidenciadas previamente en la Tabla 18. Esta aparente discrepancia, puede ocurrir cuando las diferencias generales entre grupos son leves y no alcanzan un nivel de significancia global, pero al realizar evaluaciones por pares, dichas diferencias se vuelven detectables.

Para interpretar el mapa de calor de significancia estadística (Figura 68), se definieron tres rangos de *valores p*. Los pares que no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$) se muestran en *azul/frío*. Los pares con diferencias significativas moderadas ($0,01 < p \leq 0,05$) se indican en *amarillo/tibio*. Finalmente, los pares con diferencias altamente significativas ($p \leq 0,01$) se representan en *rojo/caliente*.

Figura 68

Mapa de calor de significancia estadística de los valores p de los análisis de Dunn ($\alpha = 0,05$) de los resultados de abonos orgánicos

Parámetro	Sintético inicial					Sintético control				Sintético + PLA			Takakura inicial		Takakura control
	Sintético control	Sintético + PLA	Takakura inicial	Takakura control	Takakura + PLA	Sintético + PLA	Takakura inicial	Takakura control	Takakura + PLA	Takakura inicial	Takakura control	Takakura + PLA	Takakura control	Takakura + PLA	Takakura + PLA
N (% masa)	0,1339	0,0500	0,001	0,489	0,006	0,645	0,0500	0,420	0,205	0,1339	0,205	0,420	0,006	0,489	0,0379
P (% masa)	0,489	0,1669	0,001	0,006	0,0381	0,489	0,006	0,0381	0,1669	0,0381	0,1669	0,489	0,489	0,1669	0,489
Ca (% masa)	0,466	0,1797	0,001	0,006	0,0384	0,540	0,006	0,0422	0,1797	0,0350	0,1561	0,466	0,490	0,1676	0,490
Mg (% masa)	0,488	0,1658	0,001	0,006	0,0342	0,488	0,006	0,0413	0,1544	0,0376	0,1779	0,465	0,465	0,1779	0,538
K (% masa)	0,359	0,1083	0,1083	0,001	0,004	0,491	0,491	0,01600	0,0512	1,000	0,0853	0,207	0,0853	0,207	0,646
S (% masa)	0,441	0,1230	0,0642	0,001	0,006	0,441	0,280	0,007	0,0450	0,758	0,0539	0,217	0,1054	0,355	0,488
Fe (mg/kg)	0,491	0,1687	0,0389	0,003	0,001	0,491	0,1687	0,0218	0,0116	0,491	0,1083	0,0665	0,359	0,251	0,819
Cu (mg/kg)	0,466	0,1795	0,378	0,1450	0,0714	0,539	0,1072	0,0288	0,01136	0,0261	0,005	0,002	0,565	0,357	0,730
Zn (mg/kg)	0,003	0,01514	0,01221	0,1772	0,264	0,563	0,616	0,0973	0,0589	0,939	0,280	0,1899	0,247	0,1651	0,817
Mn (mg/kg)	0,491	0,1684	0,002	0,0292	0,003	0,491	0,01595	0,1357	0,0217	0,0852	0,422	0,1081	0,359	0,909	0,422
B (mg/kg)	0,0493	0,1429	0,464	0,001	0,005	0,616	0,217	0,1429	0,396	0,464	0,0493	0,1772	0,007	0,0373	0,537
HUM (%)	0,0373	0,006	0,488	0,488	0,1651	0,488	0,006	0,1651	0,488	0,001	0,0373	0,1651	0,1651	0,0373	0,488
C (% masa)	0,491	0,1687	0,01162	0,0218	0,001	0,491	0,0665	0,1083	0,006	0,251	0,359	0,0389	0,819	0,359	0,251
C/N (relación)	0,247	0,355	0,488	0,0827	0,0827	0,817	0,0642	0,004	0,004	0,1054	0,008	0,008	0,298	0,298	1,000
pH (H2O)	0,1222	0,003	0,341	0,002	0,001	0,1663	0,553	0,1266	0,0695	0,0480	0,886	0,666	0,0339	0,01601	0,774

Nota:

- Azul: valor $p > 0,05$; sin diferencia significativa.
- Amarillo: $0,01 < p \leq 0,05$; con diferencia significativa moderada.
- Rojo: valor $p \leq 0,01$; diferencia altamente significativa.

Fuente: Elaboración propia.

En un análisis general entre los compostajes sintéticos y artesanales, se observa que el compost sintético inicial difiere estadísticamente del Takakura, a excepción de las variables Cu (mg/kg) y C/N (relación). Por su parte, el compost sintético control también muestra diferencias significativas con todas las enmiendas Takakura, a excepción del pH (H₂O) y los micronutrientes Zn y B (mg/kg). De manera similar, el compost sintético con PLA no presenta diferencias significativas en los nutrientes N, K y S (% masa) ni en los micronutrientes Fe, Zn y Mn (mg/kg) con respecto a los compostajes Takakura.

Analizando únicamente los compostajes sintéticos entre sí, se observa que el compost inicial difiere del control en la HUM (%) y en los micronutrientes Zn y B (mg/kg). En cuanto al compost con PLA en contraste con el compost inicial, se registran nuevamente diferencias en HUM (%) y Zn (mg/kg), además en el N (% masa) y el pH (H₂O). Finalmente, los abonos maduros (con PLA y control), no presentan diferencias, por lo que se descarta una influencia estadística por la degradación del PLA en el compost sintético.

El mismo análisis hecho al compost Takakura revela diferencias significativas entre el compost inicial y el control en N (% masa), B (mg/kg) y pH (H₂O). Por su parte, se evidencian diferencias significativas entre el compost inicial y los reactores con la mezcla de compost y PLA en los parámetros de B (mg/kg), pH (H₂O) y HUM (%). Finalmente, al comparar los abonos maduros con PLA entre los controles, se identifica una diferencia significativa en los valores de N (% masa).

Los abonos obtenidos se clasifican como *Clase B* para ambos tipos de compost y sus respectivos controles, debido a que presentan concentraciones de Fe, Cu, Zn y Mn (mg/kg) que superan los niveles seguros para el desarrollo de cultivos, lo que podría representar un riesgo de toxicidad. En contraste, los valores de B (mg/kg) son inferiores a los valores recomendados, lo que también puede afectar negativamente el desarrollo de las plantas. Además, la CE registrada en los compostajes Takakura supera los límites establecidos. Este factor podría ser determinante en la aparición de efectos fitotóxicos.

En cuanto a la influencia del PLA, con base en los análisis estadísticos y los resultados de la caracterización de la degradación del material, se concluye que la presencia de PLA en los compostajes sintéticos y Takakura no generó diferencias significativas en comparación con los respectivos controles. Aunque se identificó una diferencia entre el compost Takakura con el PLA y el control, esta no puede atribuirse directamente a la biodegradación del polímero, ya que en dicho sistema la degradación del empaque fue inferior al 5 %.

6.3 Ensayos de fitotoxicidad

La Figura 69 muestra dos invernaderos tipo casa malla con la instalación del sistema de riego por aspersión para la siembra de los cultivos de cebolla y arroz. Estas se consideran plantas superiores sensibles a los productos químicos (OECD, 2006).

Figura 69

Sistema de invernaderos tipo casa malla para la ejecución de los ensayos de fitotoxicidad de los cultivos de arroz y cebolla en el LANOTEC ubicado en Pavas, San José, Costa Rica



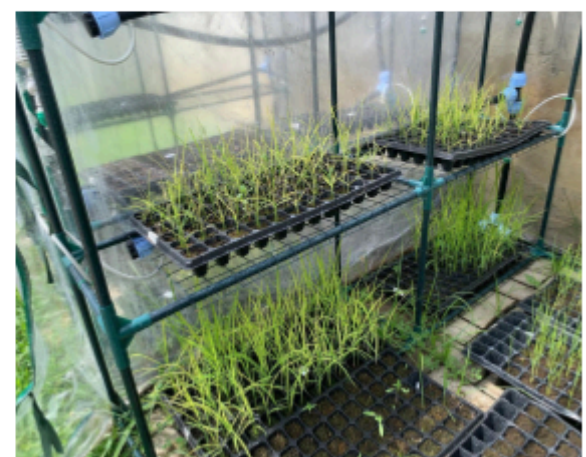
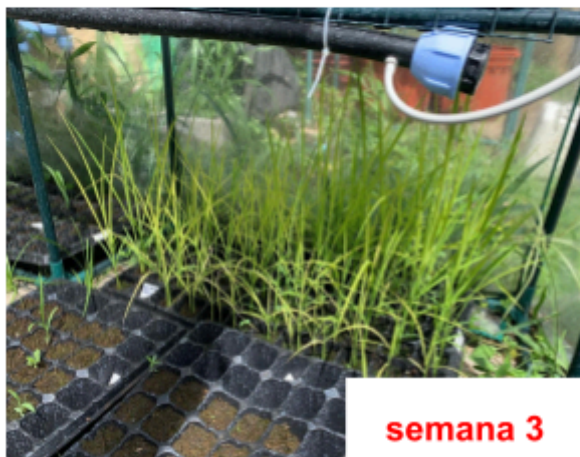
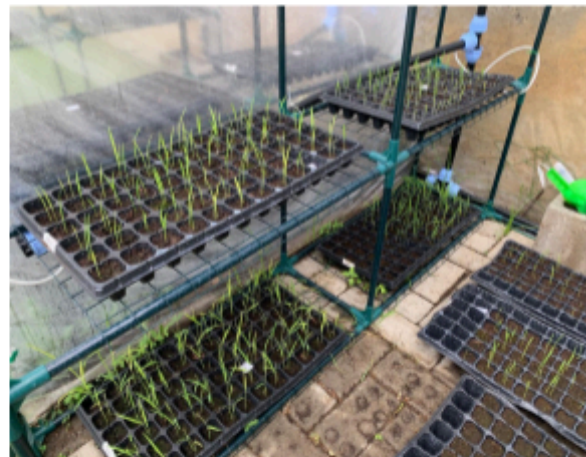
Se observó que la mezcla del sustrato de referencia (tierra) con un 25 y 50 % (m/m) del compost derivado de la desintegración del PLA, así como de sus respectivos controles, permitió una adecuada preparación del medio de cultivo. En cada bandeja se depositaron $\sim 1.311,68 \pm 94,12$ g de esta mezcla y se sembraron 200 semillas por tratamiento. La prueba duró 21 días, a partir de la germinación de al menos el 50 % de las semillas dentro del sustrato control (OECD, 2006) que para el caso de este estudio corresponde a 100 plantas. Estos resultados se compararon con la germinación del compost producido con y sin la adición del PLA que para este caso se obtuvieron 1.103 plantas.

Durante todo el ensayo, la humedad del sustrato se mantuvo dentro del rango óptimo, entre 70 y 100 % de su capacidad de retención de agua. Este control se logró de manera eficiente mediante un sistema de riego automatizado operado con temporizador, el cual permitió mantener las condiciones hídricas constantes. No se evidenciaron signos de estrés hídrico en las plántulas a lo largo del periodo experimental. Además, las inspecciones periódicas realizadas durante las etapas de siembra y cosecha confirmaron el correcto funcionamiento del sistema de aspersión y el desarrollo fenológico normal de los cultivos bajo las condiciones establecidas.

La Figura 70 presenta las muestras germinadas del cultivo de arroz. Estas se compararon considerando el número de germinaciones (%), la altura de los brotes (cm) y la biomasa (% húmeda) de las plantas obtenidas a partir de las distintas proporciones de compost (0, 25 y 50 %) mezclado con el sustrato de referencia. El porcentaje de germinación, pérdidas y biomasa cosechada, se considera en contraste con los valores registrados en el tratamiento control (tierra comercial).

Figura 70

Desarrollo fenológico de los cultivos de arroz en una casa malla ubicada Pavas, San José, Costa Rica



Como se puede observar en la Figura 70, si bien la germinación del arroz ocurrió durante la primera semana posterior a la siembra, las plantas mostraron diferencias notables entre tratamientos, especialmente en términos de altura. Además, se evidenciaron variaciones morfológicas, donde algunas plántulas presentaban mayor vigor, con tallos más gruesos, mayor desarrollo foliar y apariencia más saludable en comparación con otras. Estos resultados sugieren una influencia del compost sobre el crecimiento inicial y la vitalidad de las plantas.

El análisis posterior correspondió al cálculo de la velocidad de germinación. El arroz empezó a germinar a partir del quinto día de la siembra en todos los sustratos. Sin embargo, la cebolla nunca germinó aún después de 30 días, incluyendo las muestras que se encontraban en la tierra comercial al 100 %. Según Amigo (2018) la cebolla puede empezar a germinar a partir de siete días después de la siembra. Debido a lo anterior, se establece que los resultados obtenidos no son suficientes para aceptar o rechazar las hipótesis planteadas inicialmente, ya que no se logró germinar ninguna semilla de cebolla, como se puede apreciar en la Figura 71, donde solo se registraron la presencia de arvenses.

Figura 71

Almácigos con semillas de cebolla



Fuente: Fotografía propia.

La siembra de cebolla se repitió en cinco ocasiones entre el año 2024 y mayo de 2025. La falta de germinación no puede atribuirse a la viabilidad de las semillas, ya que en cada intento se utilizaron nuevos lotes comerciales. Tampoco puede asociarse al tipo de cobertura del invernadero, ya que, tras el primer intento fallido, se sustituyó el plástico tradicional por malla de sombra (zarán), como se observa en la Figura 72, con el objetivo de reducir la temperatura interna del invernadero y crear un microclima favorable para la germinación.

Si bien investigaciones previas como las de Segura (2023) y Torrez (2023) lograron la germinación de cebolla bajo condiciones similares y en las mismas instalaciones, dichas investigaciones se llevaron a cabo en el año 2020, cuando las temperaturas ambientales eran considerablemente más moderadas. En efecto, durante el periodo del 24 de mayo al 28 de junio de ese año, la temperatura promedio registrada fue de aproximadamente 23,00 °C, dentro del rango óptimo para la germinación de cebolla, que se sitúa entre los 13 y 25 °C (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2015; Chavarría & Fonseca, 2006).

Por el contrario, las condiciones térmicas del año 2024 e inicios de 2025 fueron significativamente más elevadas. Se estima que en Pavas, San José, la temperatura máxima promedio alcanzó valores cercanos a los 31 °C, superando el umbral superior para una germinación eficiente (Mora & Garro, s.f.).

Figura 72

Cambio de cobertura en invernaderos del LANOTEC



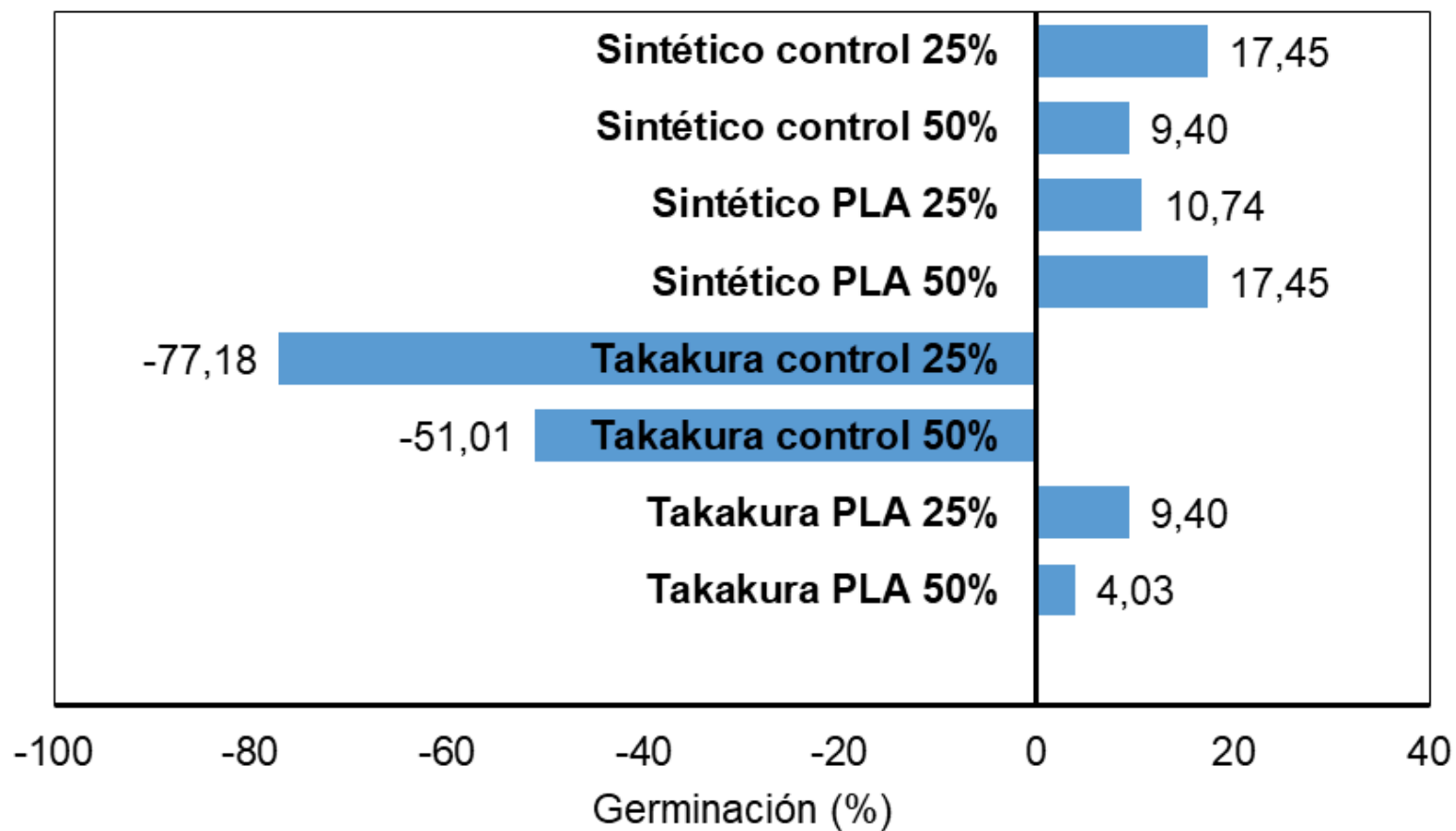
Fuente: Fotografía propia.

En relación a los análisis de fitotoxicidad del compost en el cultivo del arroz, como se puede apreciar en la Figura 73 y Apéndice 4, todos los tratamientos, con excepción del compost Takakura control en proporciones de 25 y 50 %, presentaron un mayor porcentaje de germinación en comparación con el control (tierra comercial al 100 %). Por otro lado, la Figura 74 muestra que todos los tratamientos con Takakura presentaron una mayor fitotoxicidad que sus contrapartes equivalentes con compost sintético. En los tratamientos con enmienda control al 50 %, el Takakura presentó una pérdida de 45 plántulas, mientras que el compost sintético 13. En las bandejas con 50 % de compost con el polímero, el Takakura presentó 62 pérdidas, mientras que el tratamiento sintético una. En los tratamientos con 25 % de compost, no se presentaron pérdidas en las enmiendas sintéticas, mientras que las artesanales reportaron 12 en el control y 3 en el compost con el polímero.

En cuanto a la biomasa cosechada (Figura 75), los resultados también evidencian un mayor índice de fitotoxicidad en los compostajes artesanales en comparación con los sintéticos. En los tratamientos con compost control al 50 %, se cosecharon 9,80 g en el Takakura, mientras que en el sintético se obtuvieron 110,10 g. De igual forma, en las bandejas con 50 % de compost con PLA, el Takakura produjo 25,00 g, en contraste con los 153,50 g del compost sintético. En las bandejas con 25 % del compost control, la cosecha fue de 7,00 g con el compost Takakura y 217,00 g con el sintético. Finalmente, a partir de 25 % de compost con PLA, se reportaron 102,50 g y 164,20 g con compost Takakura y sintético, respectivamente. Estos resultados se complementan con la Figura 76, donde se muestra la diferencia entre las plántulas cosechadas.

Figura 73

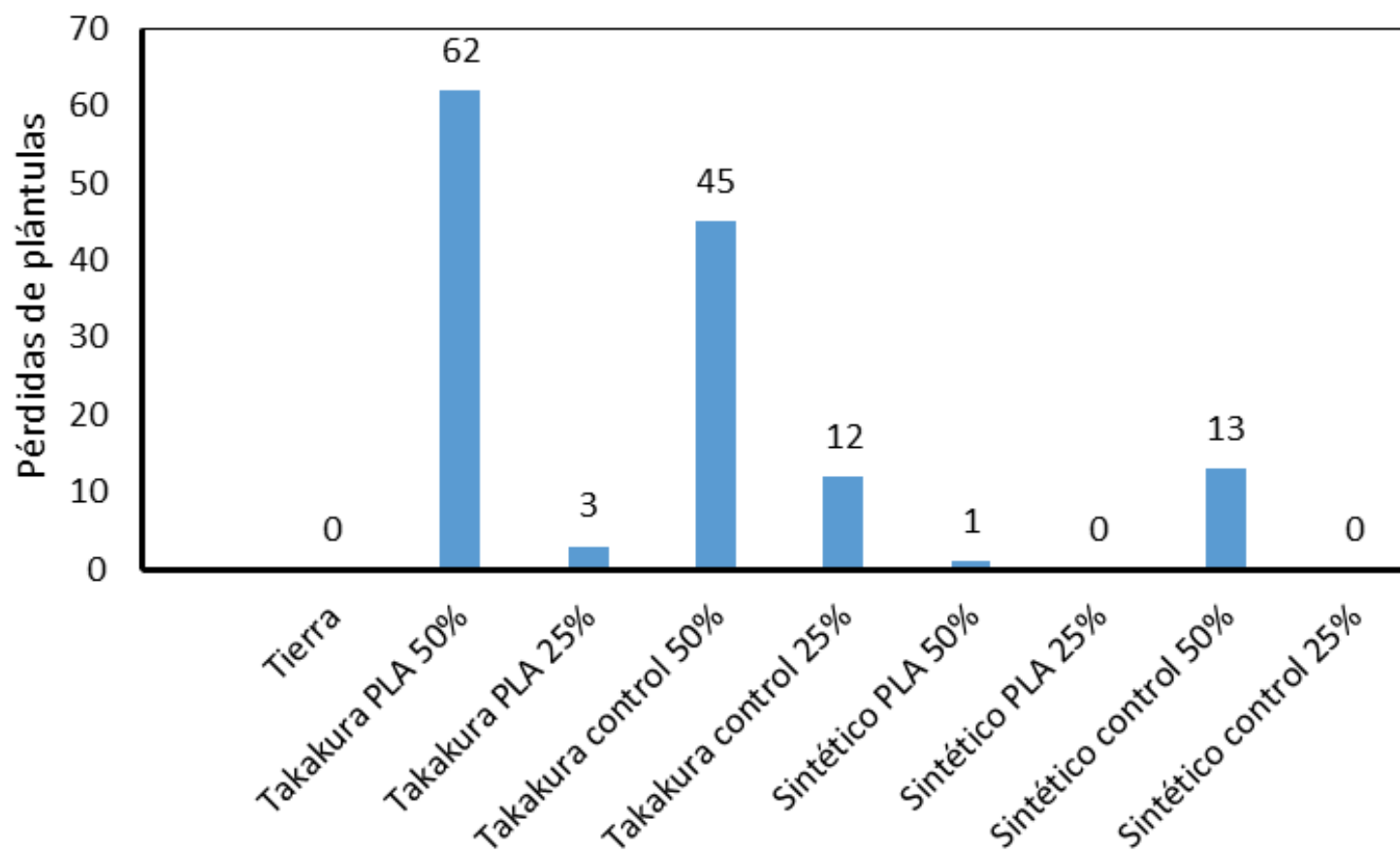
Germinación (%) según el tipo de compost y la mezcla con tierra comercial a partir de las pruebas de fitotoxicidad de los compost sintéticos y Takakura en arroz



Fuente: Elaboración propia.

Figura 74

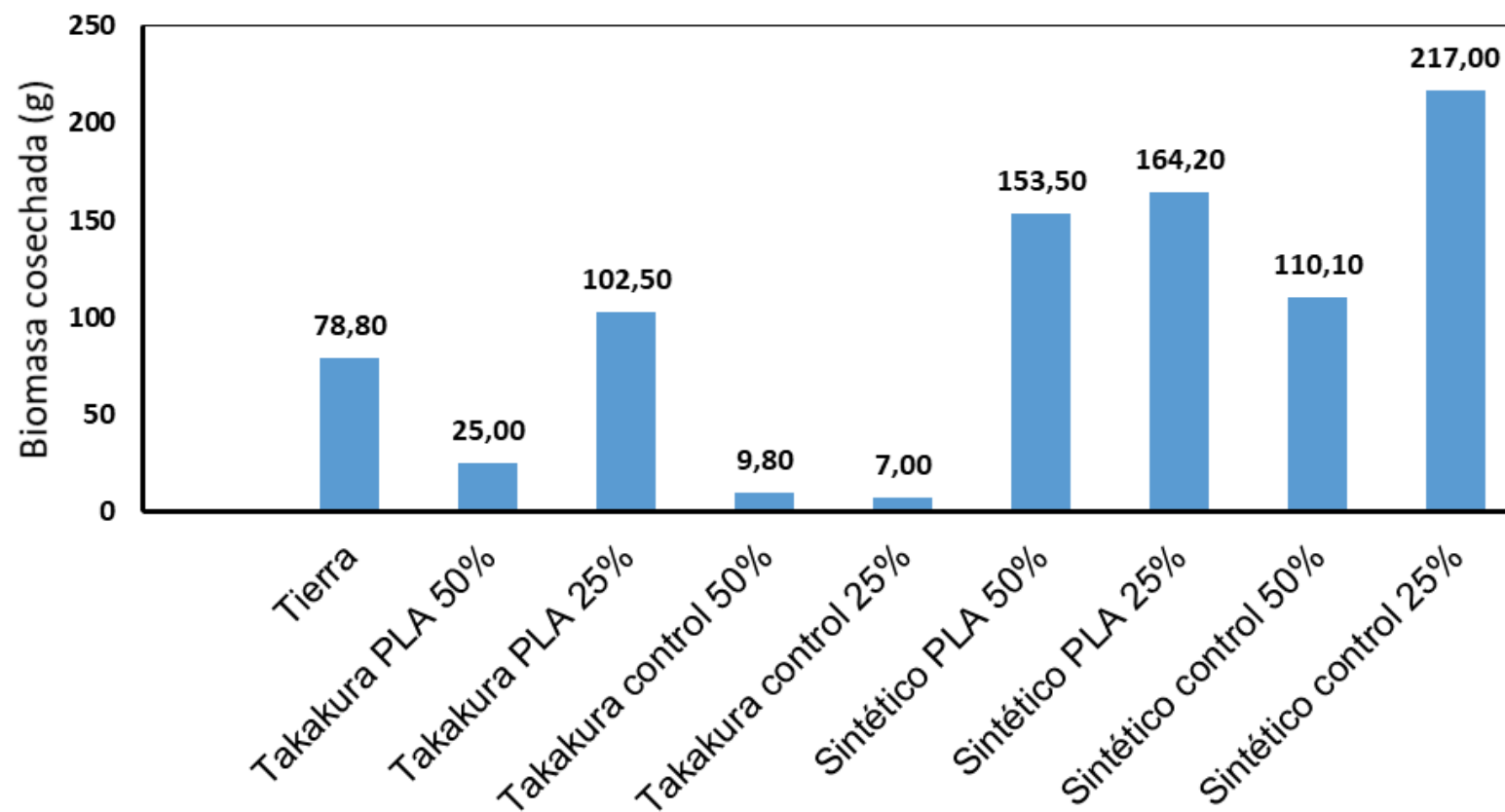
Número de plántulas perdidas en los compost sintéticos y Takakura para el cultivo de arroz



Fuente: Elaboración propia.

Figura 75

Biomasa (g) obtenida de los compost sintéticos y Takakura para el cultivo de arroz



Fuente: Elaboración propia.

Figura 76

Biomasa cosechada en las pruebas de fitotoxicidad de compost en el cultivo de arroz



Fuente: Fotografías propias

Estos resultados se pueden relacionar con la alta concentración de elementos menores Fe y Mn (mg/kg), que genera toxicidad en el crecimiento de las plantas al momento de aplicar abonos a suelos agrícolas (Castro et. al., 2023). Un resultado similar se obtiene con los valores del micronutriente B (mg/kg), que se encontró por debajo de lo recomendado para un correcto desarrollo fenológico de las plántulas (INN, 2025; Inostroza y Gonzalez, 2020). Si bien otros elementos menores como el Cu (mg/kg) y Zn (mg/kg) también superaron los valores recomendados, y aunque todos los compostajes presentaron concentraciones elevadas de estos elementos, los compost artesanales triplicaron a sus equivalentes sintéticos. Por otro lado, cabe destacar que los compost Takakura presentaron valores de CE (mS/cm) superiores a los límites recomendados. Este resultado pudo haber dificultado el manejo de la enmienda y contribuido en la fitotoxicidad observada en los cultivos (Beltrán et al., 2020).

En la Tabla 19 se presentan los valores promedios del desarrollo de las plantas en cada uno de los tratamientos. Adicionalmente, en la prueba estadística de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$) aplicada al largo de las raíces (Tabla 20), de los tallos (Tabla 21) y de las hojas (Tabla 22), evidencia que los datos no presentan, en general, una distribución normal. Específicamente, sólo el tratamiento con compost sintético con PLA al 25 % cumple con el criterio de normalidad en el largo de las raíces. En cuanto al largo del tallo, los tratamientos con Takakura control al 25 % y Takakura con PLA al 50 % presentan una distribución normal, mientras que los demás no la cumplen. Finalmente, respecto al largo de las hojas, los tratamientos con compost sintético control al 50 %, compost sintético con PLA al 25 %, Takakura control al 25 % y Takakura con PLA al 25 % cumplen con el supuesto de normalidad, a diferencia del resto de los tratamientos. Estos resultados se complementan con los apéndices 5, 6 y 7, donde se presentan los diagramas de caja para cada parámetro y tratamiento. Debido a lo anterior, se establece analizar los resultados por medio de las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y Dunn ($\alpha = 0,05$) para identificar si existen diferencias significativas.

Tabla 19

Largo de las raíces, tallos y hojas como resultado de las pruebas de fitotoxicidad de compost en el cultivo de arroz

Enmienda	Raíz (cm)	Tallo (cm)	Hojas (cm)
Tierra comercial 100 %	8,03 ± 3,25	4,10 ± 1,68	10,56 ± 4,74
Sintético control 50 %	5,47 ± 2,14	4,68 ± 1,16	11,54 ± 4,26
Sintético control 25 %	6,75 ± 2,66	6,59 ± 3,02	15,96 ± 7,59
Sintético + PLA 50 %	6,74 ± 2,48	6,67 ± 2,12	17,22 ± 5,55
Sintético + PLA 25 %	7,53 ± 2,80	6,66 ± 2,46	17,28 ± 6,09
Takakura control 50 %	5,49 ± 3,20	4,07 ± 1,58	7,72 ± 4,18
Takakura control 25 %	5,40 ± 3,77	4,58 ± 1,25	10,73 ± 4,41
Takakura + PLA 50 %	6,10 ± 2,58	4,12 ± 0,95	6,94 ± 3,35
Takakura + PLA 25 %	6,80 ± 2,84	5,28 ± 1,32	11,48 ± 3,90

Nota: Todos los análisis se hicieron por duplicado. *Fuente:* Elaboración propia

Tabla 20

Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) en el largo de las raíces como resultado de las pruebas de fitotoxicidad de los compost en el cultivo de arroz

Enmienda	Valor W	Valor p	Normalidad
Tierra comercial 100 %	0,934	$2,13 \times 10^{-6}$	No
Sintético control 50 %	0,981	0,0373	No
Sintético control 25 %	0,978	0,0075	No
Sintético + PLA 50 %	0,963	$1,57 \times 10^{-4}$	No
Sintético + PLA 25 %	0,992	0,456	Sí
Takakura control 50 %	0,868	0,0022	No
Takakura control 25 %	0,891	0,0194	No
Takakura + PLA 50 %	0,935	$1,68 \times 10^{-4}$	No
Takakura + PLA 25 %	0,945	$7,31 \times 10^{-6}$	No

Nota: Todos los análisis se hicieron por duplicado. *Fuente:* Elaboración propia

Tabla 21

Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) en el largo de los tallos como resultado de la prueba de fitotoxicidad de los compost en el cultivo de arroz

Enmienda	Valor W	Valor p	Normalidad
Tierra comercial 100 %	0,976	0,0104	No
Sintético control 50 %	0,980	0,0301	No
Sintético control 25 %	0,938	$7,54 \times 10^{-7}$	No
Sintético + PLA 50 %	0,980	0,0138	No
Sintético + PLA 25 %	0,963	$2,08 \times 10^{-4}$	No
Takakura control 50 %	0,863	$1,74 \times 10^{-3}$	No
Takakura control 25 %	0,932	0,1369	Sí
Takakura + PLA 50 %	0,976	0,0887	Sí
Takakura + PLA 25 %	0,960	$1,06 \times 10^{-3}$	No

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

Evaluación de la normalidad (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$) en el largo de las hojas como resultado de la prueba de fitotoxicidad de los compost en el cultivo de arroz

Enmienda	Valor W	Valor p	Normalidad
Tierra comercial 100 %	0,968	$1,56 \times 10^{-3}$	No
Sintético control 50 %	0,986	0,1283	Sí
Sintético control 25 %	0,957	$3,76 \times 10^{-5}$	No
Sintético + PLA 50%	0,972	$1,33 \times 10^{-3}$	No
Sintético + PLA 25 %	0,989	0,2320	Sí
Takakura control 50 %	0,888	$6,02 \times 10^{-3}$	No
Takakura control 25 %	0,952	0,3440	Sí
Takakura + PLA 50 %	0,965	0,0154	No
Takakura + PLA 25 %	0,986	0,1234	Sí

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis estadístico de Kruskal-Wallis (Tabla 23) demuestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos, se obtuvieron valores de $\chi^2 \sim 10^{-66}$. Se observan diferencias significativas entre las siembras realizadas con el compost sintético y la tierra comercial, se presentaron rangos de $\chi^2 \sim 10^{-36}$. Asimismo, las siembras con Takakura y tierra comercial presentan rangos de $\chi^2 \sim 10^{-41}$, lo que también indica una diferencia significativa. Por lo tanto, se realizó una prueba de comparaciones múltiples post hoc de Dunn tanto para los tratamientos con el compost sintético (Figura 77) como con el Takakura (Figura 78), para identificar dónde exactamente se encuentran las diferencias significativas.

Tabla 23

Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) para el compost sintético y Takakura

Entre todos los tratamientos			
Enmienda	Valor H	χ^2	Diferencia significativa
Largo de las raíces	88,46	$9,46 \times 10^{-16}$	Sí
Largo de los tallos	261,32	$6,47 \times 10^{-52}$	Sí
Largo de las hojas	329,80	$1,83 \times 10^{-66}$	Sí
Tierra comercial versus compost sintéticos			
Largo de las raíces	70,72	$1,58 \times 10^{-14}$	Sí
Largo de los tallos	171,98	$3,82 \times 10^{-36}$	Sí
Largo de las hojas	156,86	$6,88 \times 10^{-33}$	Sí
Tierra comercial versus compost Takakura			
Largo de las raíces	98,85	$1,71 \times 10^{-20}$	Sí
Largo de los tallos	194,99	$4,33 \times 10^{-41}$	Sí
Largo de las hojas	78,12	$4,34 \times 10^{-16}$	Sí

Fuente: Elaboración propia

Figura 77

Mapa de calor de significancia estadística de los valores p del análisis de Dunn ($\alpha = 0,05$) para los resultados de fitotoxicidad en arroz del compost sintéticos con PLA 40 μm de espesor

Parámetro	Tierra Comercial 100 %				Sintético control 50%			Sintético control 25%		Sintético + PLA 25%
	Sintético control		Sintético + PLA		Sintético control	Sintético + PLA		Sintético + PLA		Sintético + PLA
	50%	25%	50%	25%		50%	25%	50%	25%	
	50%	25%	50%	25%	25%	50%	25%	50%	25%	50%
Largo de raíces	7,64E-14	4,26E-04	3,22E-04	0,341	2,21E-05	3,22E-05	1,931E-11	0,935	8,60E-03	6,84E-03
Largo de tallos	4,47E-03	0,00	0,00	0,00	4,01E-09	4,44E-16	5,30E-13	0,01816	0,1414	0,390
Largo de hojas	0,234	1,994E-10	0,00	0,00	2,53E-07	8,88E-16	1,599E-14	2,56E-03	7,00E-03	0,781

Fuente: Elaboración propia.

Figura 78

Mapa de calor de significancia estadística de los valores p del análisis de Dunn ($\alpha = 0,05$) para los resultados de fitotoxicidad en arroz del compost Takakura con PLA 40 μm de espesor

Parámetro	Tierra Comercial 100 %				Takakura control 50%			Takakura control 25%		Takakura + PLA 25%
	Takakura control		Takakura + PLA		Takakura control	Takakura + PLA		Takakura + PLA		Takakura + PLA
	50%	25%	50%	25%		50%	25%	50%	25%	
	50%	25%	50%	25%	25%	50%	25%	50%	25%	50%
Largo de raíces	3,23E-05	6,82E-05	4,29E-07	2,67E-04	0,851	0,383	0,0313	0,308	0,0296	0,0522
Largo de tallos	0,594	0,1824	0,750	3,64E-10	0,1456	0,753	5,66E-05	0,1436	0,0712	6,41E-09
Largo de hojas	5,56E-03	0,988	2,65E-07	0,216	0,0435	0,602	5,00E-04	3,77E-03	0,544	2,80E-10

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 77, existen diferencias altamente significativas entre la tierra comercial y los tratamientos con el compost sintético, evidenciadas incluso por valores cercanos o iguales a 0. Estos resultados indican diferencias estadísticas entre tratamientos. En complemento con las Tablas 19, las Figuras 75 y 76 y el Apéndice 4, se aprecia que estas diferencias favorecen a las siembras con el compost sintético, ya que las plántulas cosechadas a partir de este presentaron mayor vigor, con tallos más gruesos y un mayor desarrollo foliar.

Entre los tratamientos evaluados, la siembra realizada con compost sintético control al 50 % presentó diferencias significativas con todos los demás. Entre el compost sintético control al 25 % y el compost sintético con PLA al 50 %, no se observaron diferencias en el largo de las raíces, a diferencia del largo de las hojas y el tallo que sí presentaron diferencias. Por otro lado, el compost sintético al 25 % (control y con PLA), presentó diferencias en el largo de las hojas y las raíces. Finalmente, entre el compost sintético con PLA (25 y 50 %), las diferencias se presentaron en el desarrollo de las raíces. Además, la Figura 74 ilustra que el compost sintético con PLA presentó menores pérdidas de las plántulas.

A partir de estos resultados, junto con los obtenidos en los análisis de calidad de abonos orgánicos, se concluye que el compost sintéticos generado a partir de la biodegradación del PLA puede utilizarse como enmienda orgánica, clasificándose como Abono Clase B, categoría que corresponde a productos de calidad intermedia, cuyo uso directo en suelos agrícolas presenta ciertas restricciones. Su aplicación es recomendable en macetas u otros sistemas controlados, mezclado con componentes que corrijan sus deficiencias, tal como lo sugiere García Céspedes et al. (2014). En este estudio, se recomienda una proporción de 25 % de compost sintético y 75 % de tierra comercial.

Los resultados obtenidos en el compost Takakura, demuestran que existen diferencias significativas en el largo de las raíces en todos los tratamientos, en comparación con la tierra comercial. Esta última, sólo presentó diferencias en el largo del tallo respecto al tratamiento con compost artesanal con PLA al 25 %. En cuanto al largo de las hojas, se evidenciaron diferencias frente a los tratamientos con compost al 50 % (tanto control como con PLA).

Estos resultados, en conjunto con los observados en las Figuras 73, 74, 75 y 76, así como en las Tablas 19 y el Apéndice 4, evidencian la presencia de fitotoxicidad en el cultivo del arroz asociado al uso del compost Takakura. Cabe destacar que las diferencias significativas registradas entre los compost artesanales (control y con PLA) no pueden atribuirse a la presencia del polímero, ya que se registró un porcentaje de degradación del PLA inferior al 5 %. Estas diferencias parecen estar más relacionadas con el porcentaje de compost mezclado con la tierra y con la elevada salinidad de estas enmiendas (CE elevada), que con la adición del PLA. En los compost Takakura la CE excedió considerablemente los valores recomendados, registrando 20,8 mS/cm en el tratamiento control y 25,8 mS/cm en el tratamiento con PLA, cuando el límite sugerido es ≤ 8 mS/cm. Este exceso puede afectar negativamente la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.

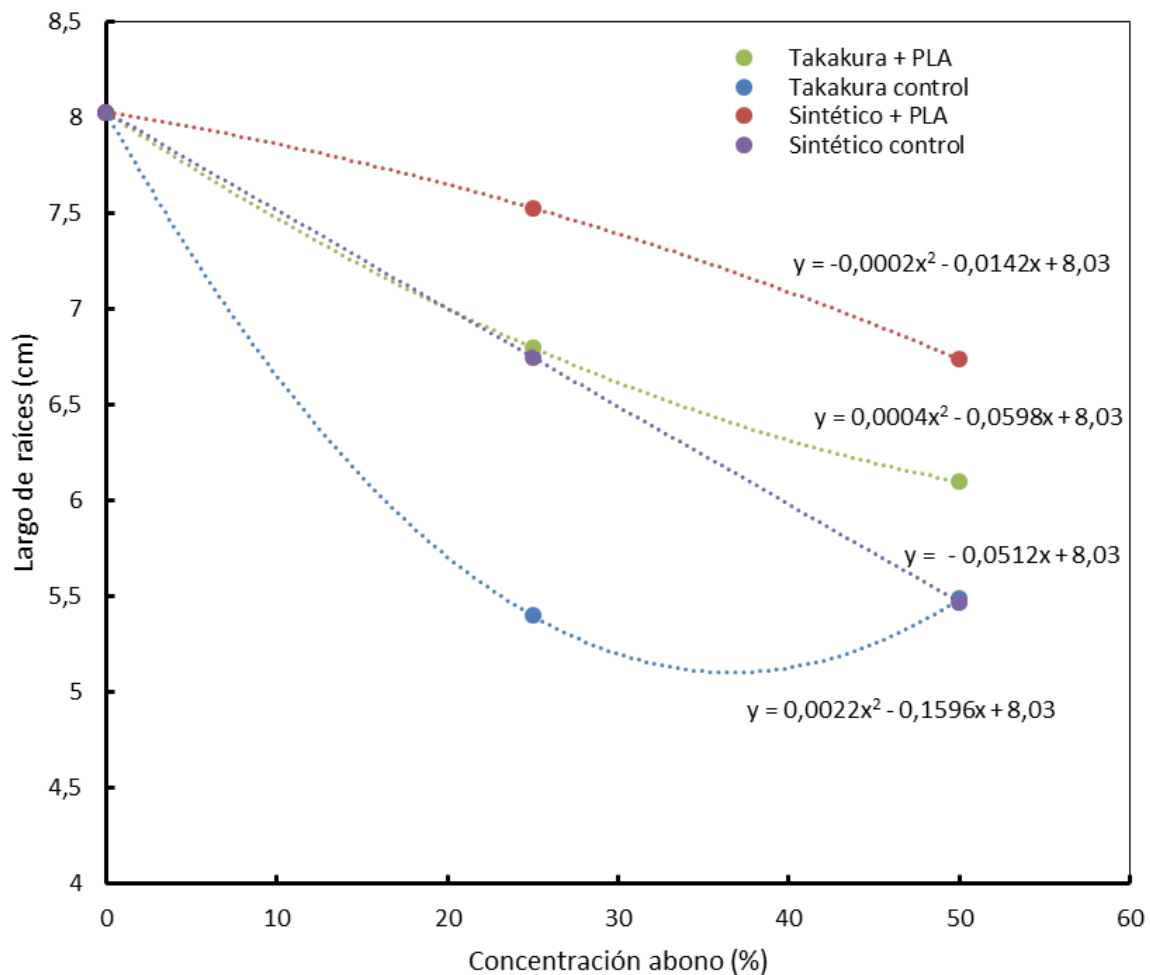
La fitotoxicidad registrada en las plántulas de arroz se evidenció al comparar los tratamientos con compost frente al control con tierra comercial. Esta se manifestó en un mayor número de pérdidas de plántulas durante el proceso de siembra, así como en deficiencias en el desarrollo vegetativo, expresadas en raíces, tallos y hojas más cortos, delgados y frágiles. Estas condiciones comprometieron el crecimiento saludable de las plantas, lo que se reflejó directamente en una menor producción de biomasa al final del ensayo. La reducción de biomasa cosechada responde tanto a la disminución en el número de plantas sobrevivientes como a su baja calidad fisiológica, consecuencia de las condiciones adversas generadas por los compost utilizados.

A través de un análisis de regresión lineal ($y = Ax^2 + Bx + C$), se estimó la relación dosis-respuesta de las diferentes concentraciones de compost aplicadas en las pruebas de fitotoxicidad. Cabe mencionar que todas las ecuaciones obtenidas tienen un

coeficiente de determinación $R^2 = 1$. Se observó que el crecimiento de raíces (Figura 79) se vio negativamente afectado en los tratamientos con compost orgánico tipo Takakura y compost sintético, posiblemente debido a la deficiencia de boro (B) identificada en los análisis de los compost orgánicos (Inostroza y González, 2020).

Figura 79

Relación dosis - respuesta para el largo de las raíces en pruebas de fitotoxicidad en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)

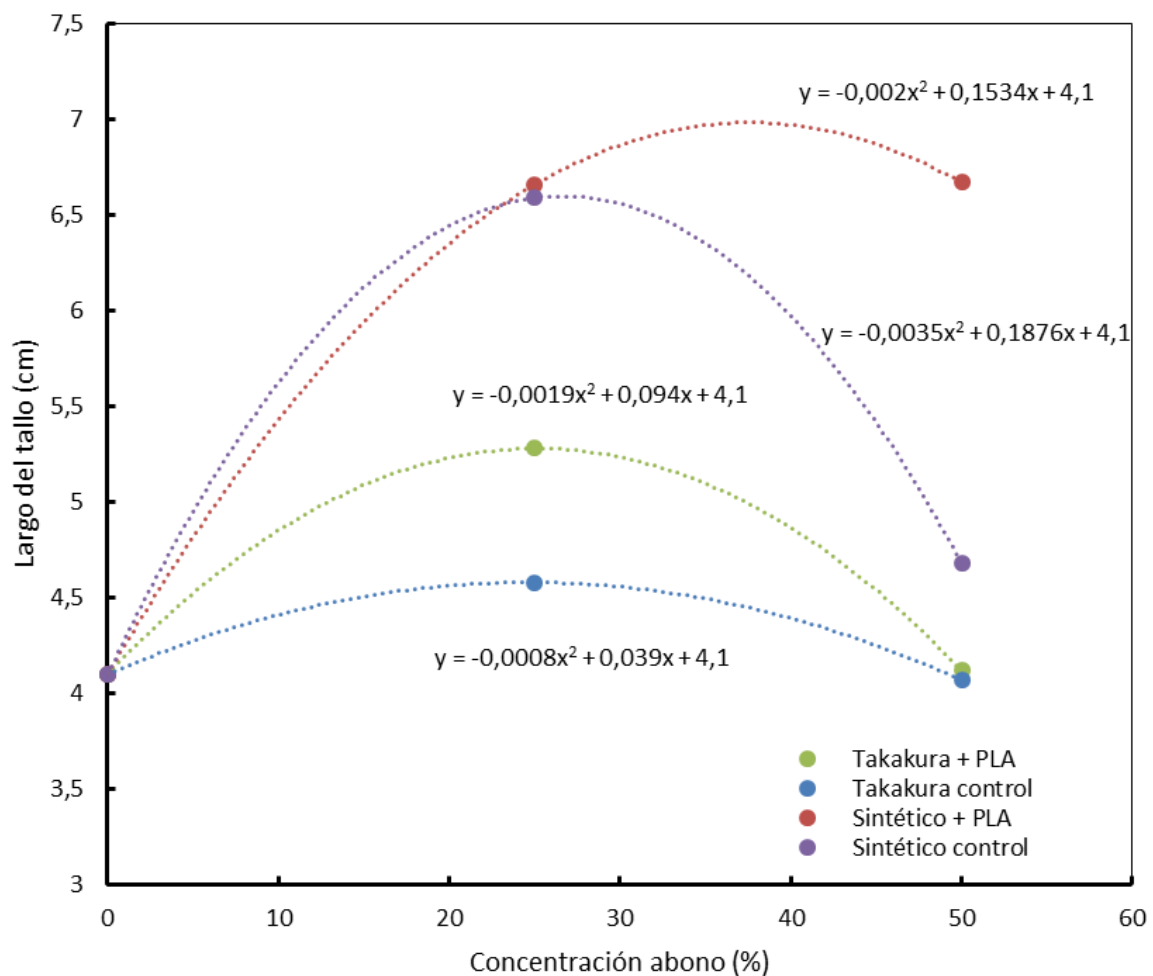


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la longitud del tallo (Figura 80), todos los tratamientos mostraron efectos positivos en su desarrollo, destacando el compost sintético con PLA como la enmienda más eficaz. En el caso del desarrollo foliar (Figura 81), se evidenció una respuesta fitotóxica en los tratamientos con Takakura, mientras que los tratamientos con compost sintéticos promovieron el crecimiento, especialmente aquellos con 25 % de compost sintético (con PLA o en control), sobresaliendo nuevamente el tratamiento con compost sintético y PLA como el más beneficioso para el desarrollo foliar.

Figura 80

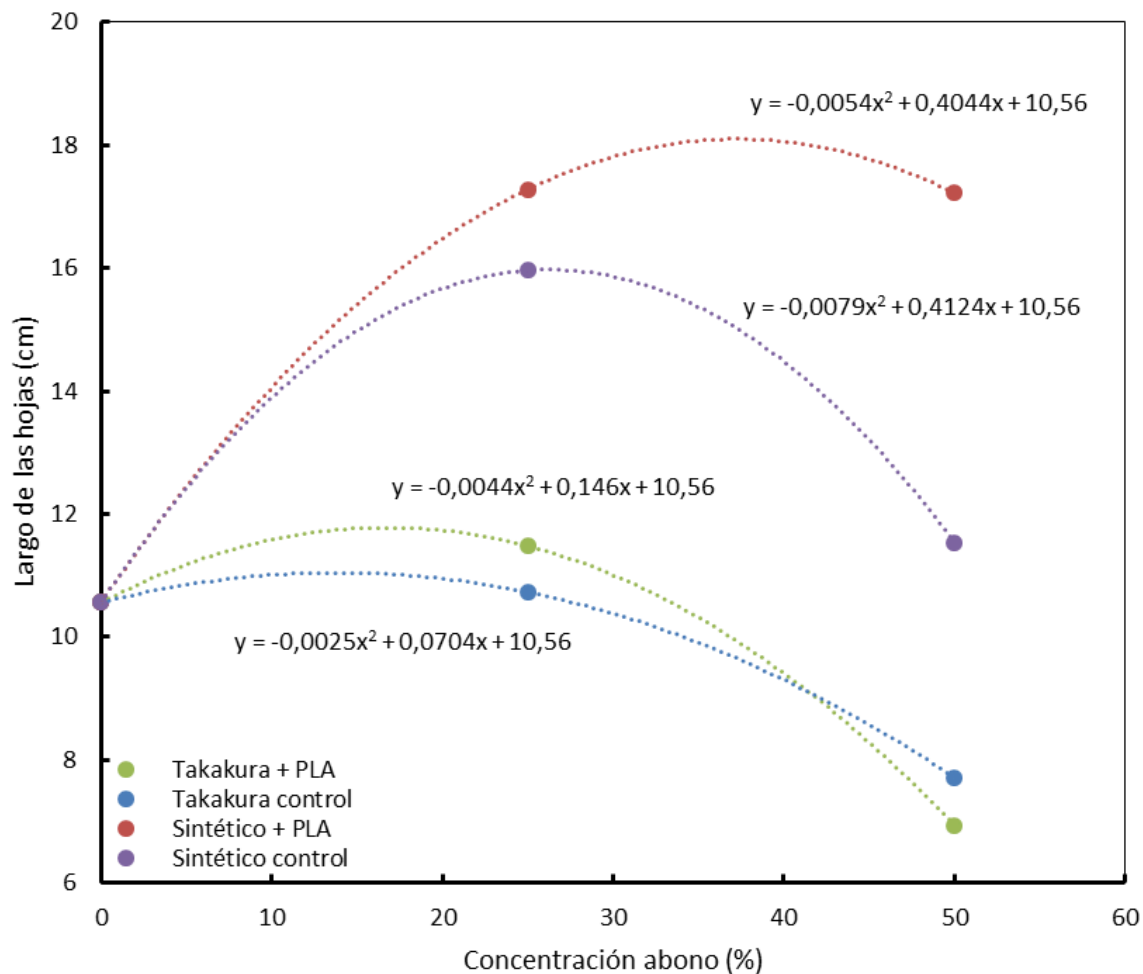
Relación dosis - respuesta para el largo del tallo en las pruebas de fitotoxicidad en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 81

Relación dosis - respuesta para el desarrollo vegetativo del largo de las hojas en pruebas de fitotoxicidad en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)

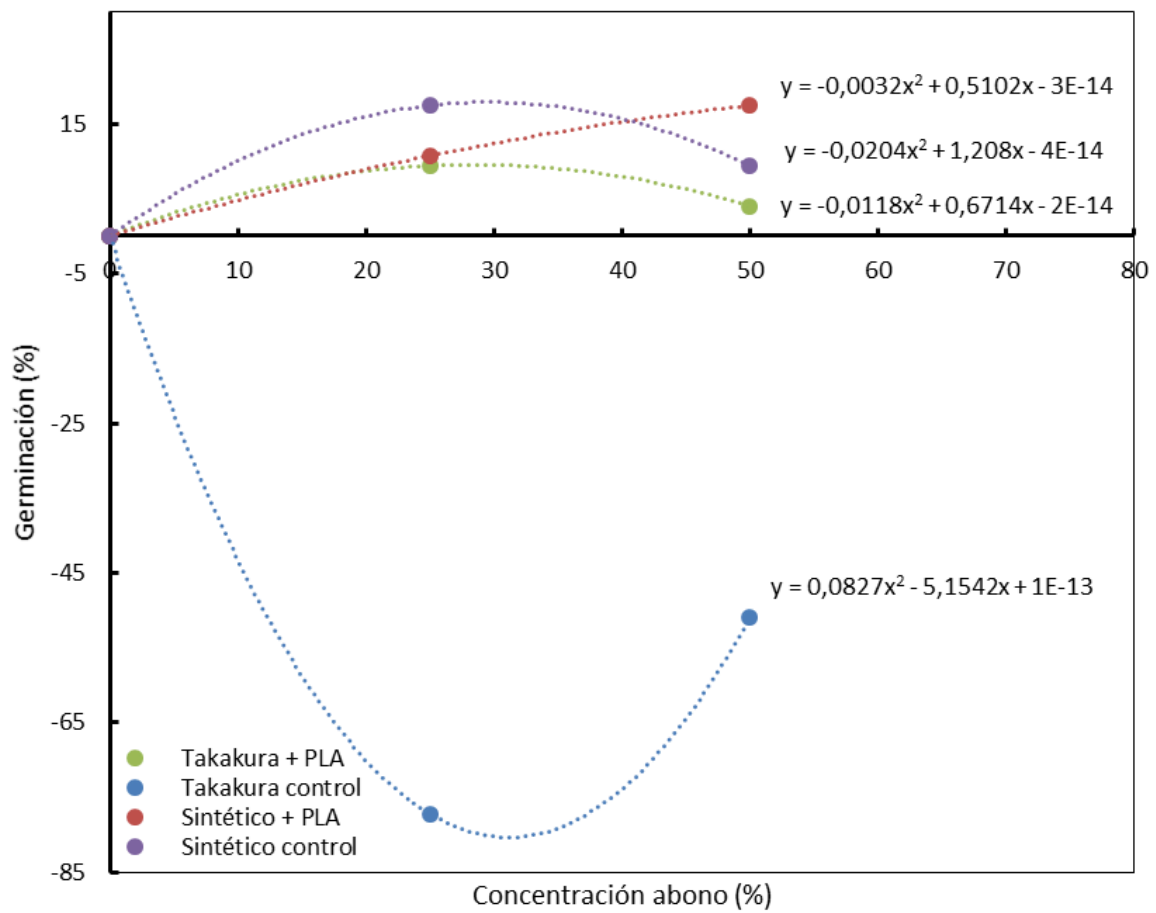


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al porcentaje de germinación (Figura 82), las mezclas con el compost sintético destacaron nuevamente por su mayor eficiencia, mientras aquellas mezclas con Takakura presentaron el mayor grado de fitotoxicidad. Estos resultados son consistentes con el número de plántulas pérdidas (Figura 83) y la biomasa cosechada (Figura 84) que se registraron en cada uno de los tratamientos.

Figura 82

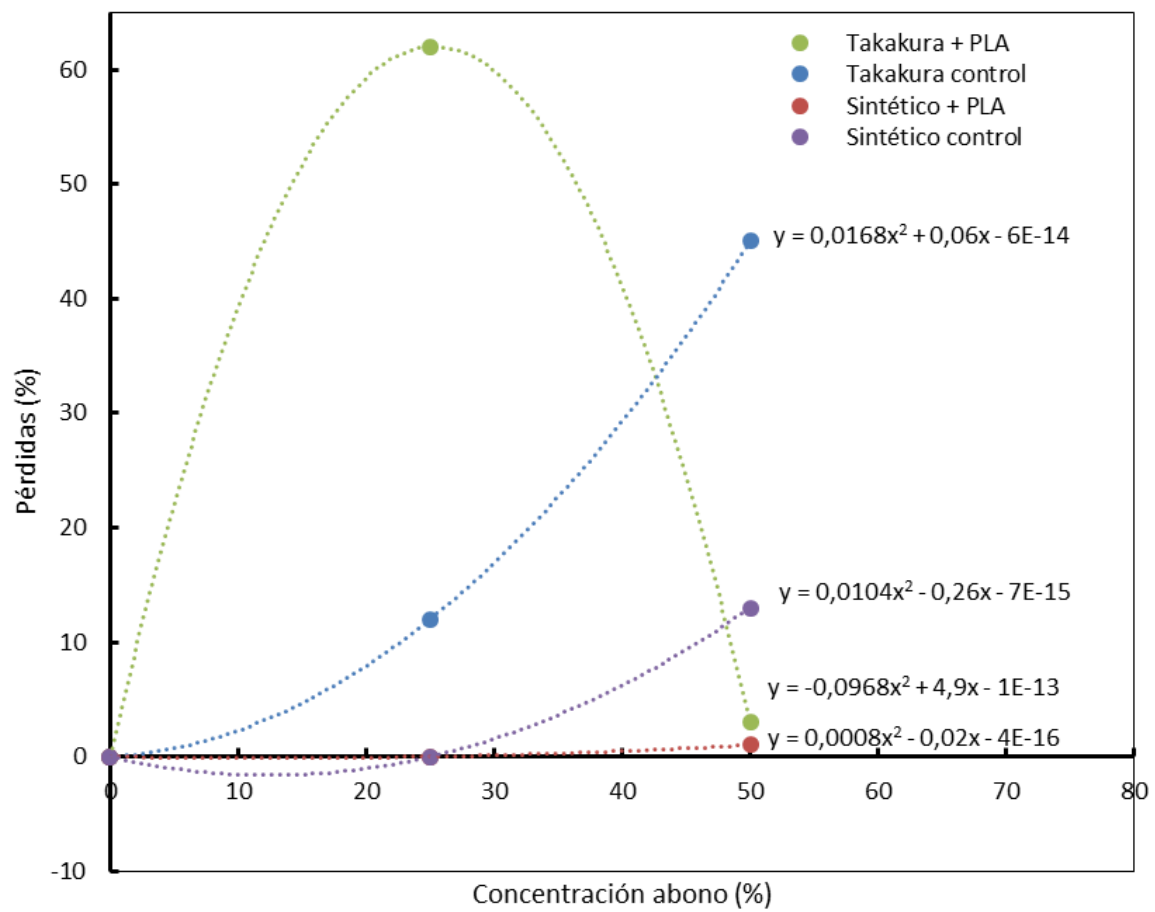
Relación dosis - respuesta en la germinación del arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 83

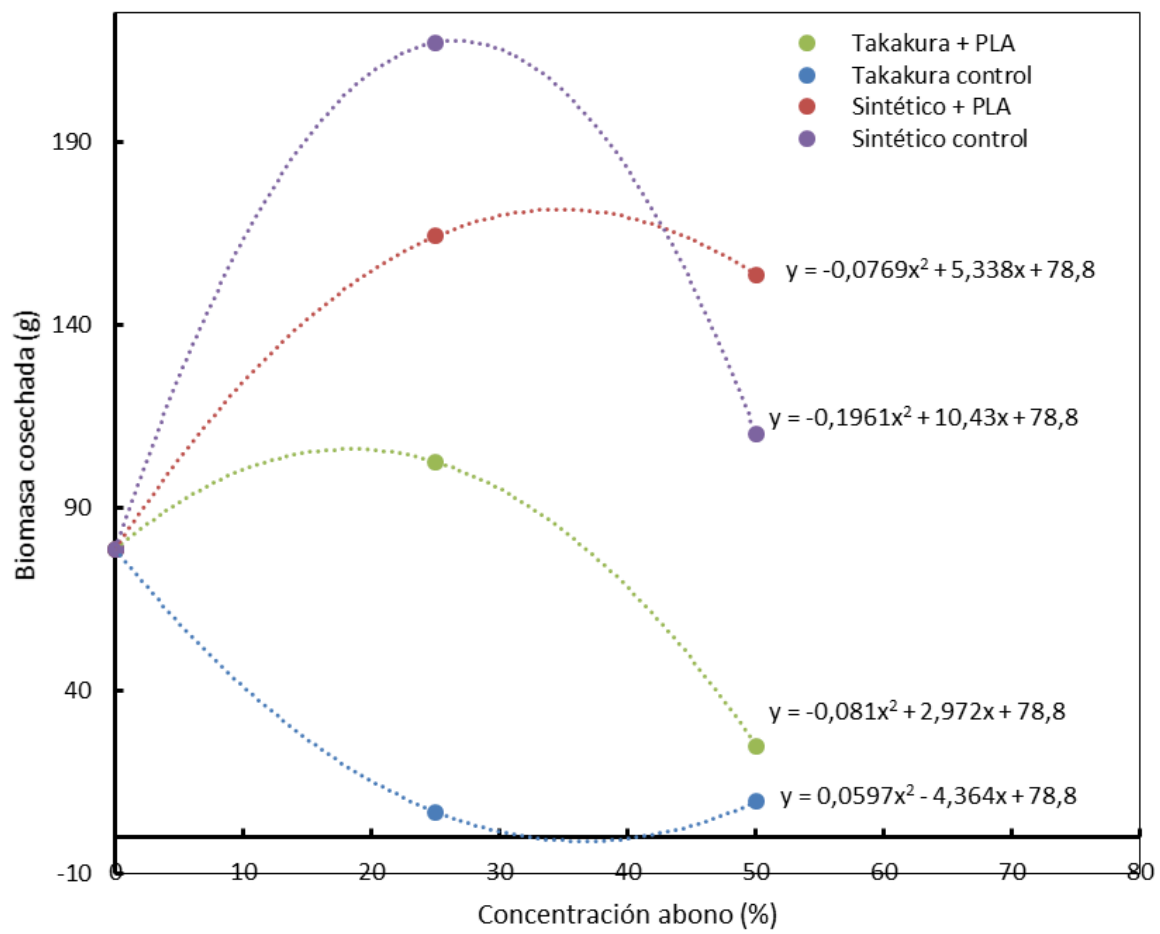
Relación dosis - respuesta del número de pérdidas en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 84

Relación dosis - respuesta de la biomasa en arroz sembrado en compost con PLA (0, 25 y 50 %)



Fuente: Elaboración propia.

Si bien no se logró la germinación de las semillas de cebolla, se considera que el objetivo de la presente investigación fue alcanzado, al obtener resultados concluyentes en la prueba de fitotoxicidad con semillas de arroz. Estos resultados permitieron demostrar que los empaques de PLA de 40 μm son biodegradables y compostables en sistemas de compostaje sintético bajo condiciones controladas de laboratorio. Además, se evidenció que los compost artesanales tipo Takakura generan fitotoxicidad en los cultivos debido a su calidad como compost, y no por la presencia del polímero.

Durante el desarrollo experimental se realizaron en total cinco intentos de siembra con semillas de cebolla. A lo largo de estos ensayos, se implementaron mejoras significativas en el sistema de riego, con el fin de asegurar un ambiente óptimo para el desarrollo de las plántulas y evitar el estrés hídrico. También se sustituyó la cobertura plástica de los invernaderos por mallas de sombra (zarán), con la intención de mitigar el exceso de calor y promover condiciones más estables. No obstante, a pesar de estos ajustes, las condiciones ambientales externas no permitieron establecer un biosistema favorable para la germinación de la cebolla.

Una posible explicación de este fenómeno es el aumento progresivo de las temperaturas debido al cambio climático, el cual tiene un efecto más pronunciado en zonas urbanas como Pavas, San José, donde se ubica el sitio experimental. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC] (2024), entre 2022 y 2023 se registró un incremento de 1 °C en las temperaturas máximas del país, pasando de 28,1 a 29,1 °C en zonas como el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. A esto se suma el fenómeno conocido como *isla de calor urbana*, que agrava la acumulación de calor en sectores urbanizados, en zonas con alta densidad de construcciones, poca vegetación y gran superficie impermeable (Oke, 1982; Instituto Meteorológico Nacional [IMN], 2021). Según Mora y Garro (s.f.), en el distrito de Pavas se han reportado temperaturas máximas promedio cercanas a los 31 °C entre los años 2010 y 2024, lo que podría haber generado un ambiente térmico desfavorable para la germinación de la cebolla.

Es importante considerar que la germinación de la cebolla requiere condiciones específicas para un desarrollo óptimo. En Costa Rica, se ha documentado que las temperaturas óptimas para la germinación de cebolla se encuentran entre 13 y 25 °C, con una temperatura ideal de 20 °C; además el sustrato debe tener una humedad constante (IICA, 2015). Temperaturas superiores a 30 °C pueden inhibir la germinación y afectar la viabilidad de la semilla (Chavarría & Fonseca, 2006). Por lo tanto, las altas temperaturas registradas durante el período de experimentación, comprendido entre octubre 2024 y abril 2025, pudieron haber superado el umbral térmico adecuado para esta etapa del cultivo, provocando la falta de germinación a pesar de las mejoras implementadas en el manejo agronómico.

7. CONCLUSIONES

1. La diferencia entre los valores teóricos y experimentales de los componentes del compost sintético no superó el 5 % de tolerancia permitida, lo cual garantiza la validez del procedimiento seguido. Por esta razón, se obtuvo una matriz de compost sintético homogénea y estandarizada.
2. El uso de matrices de compostaje artesanales implica una limitación en el control de las condiciones del biosistema, dado que estas no se rigen por estándares normalizados, sino por lineamientos descritos en manuales técnicos. No obstante, la utilización de un compost semilla común y la aplicación de un refuerzo microbiológico uniforme en toda la matriz artesanal permitieron estandarizar, en la medida de lo posible, las condiciones del ensayo. Esto hizo viable una evaluación comparativa y controlada del comportamiento del polímero durante el proceso de compostaje.
3. La inspección sensorial durante el desarrollo del experimento permitió identificar el crecimiento de colonias microbianas en ambas matrices de compost. Estas colonias se consideran benéficas ya que correspondían a microorganismos aerobios.
4. El sistema de compostaje Takakura demostró ser un mecanismo altamente eficaz para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. Durante el experimento, fue alimentado con residuos comúnmente excluidos de otros métodos de compostaje (huesos, carne y mariscos) los cuales fueron biodegradados con éxito en ~ 60 días en los reactores Takakura. Además, el proceso no generó malos olores, lixiviados, ni atrajo plagas o vectores.
5. Las inspecciones sensoriales realizadas en los reactores de compost sintético, junto con el cumplimiento del cronograma establecido por la norma ISO 20200:2004 y el monitoreo mediante sensores, permiten un control adecuado del sistema de compostaje. Se mantuvieron los niveles de humedad recomendados (55 - 35 % de la masa total del compost), se evitaron condiciones anaeróbicas, y se llevó a cabo un registro tanto cualitativo como cuantitativo del proceso.
6. El manejo progresivo de la alimentación en los reactores Takakura permitió evitar la saturación por exceso de materia orgánica. Además, el volteo frecuente de las matrices favoreció una distribución homogénea del material, evitó la acumulación excesiva de humedad y garantizó el contacto directo entre los fragmentos de polímero y el compost maduro.
7. La temperatura promedio en los reactores de compost sintético se mantuvo ~56 °C, lo que favoreció el desarrollo del proceso y generó condiciones óptimas para la hidrólisis del PLA. En contraste, los sistemas de compostaje artesanal alcanzaron temperaturas ~27 °C, sin llegar a la fase termofílica ni superar el umbral térmico necesario para activar la hidrólisis del polímero. Esta diferencia en temperatura resultó determinante en el comportamiento del material durante el compostaje.
8. El pH se mantuvo en los rangos recomendados. Los valores iniciales en las matrices de compostaje fueron ~ 6.62 y 6.52 para los reactores artesanales y sintéticos, respectivamente. Al finalizar el proceso de maduración se alcanzaron valores de ~8 en ambos sistemas. Estos resultados confirman la estabilidad y salud de los sistemas de compostaje.
9. En los sistemas de compostaje sintético, el PLA de 40 µm se degradó por completo en los tres reactores, alcanzando una biodegradabilidad del 100 % dentro del plazo de 90 días establecido por la norma ISO 20200:2004.
10. El PLA de 40 µm en el compostaje Takakura perdió ~ 4,41 % de masa. Estos resultados se validaron al tener una variabilidad menor al 10 % entre las réplicas. En consecuencia, se concluye que el PLA de 40 µm no es biodegradable en el sistema de compostaje Takakura.
11. Ambos tipos de compost alcanzaron una reducción $R \geq 30 \%$; por lo tanto, se considera que todos los compost obtenidos son aptos para su uso.

12. La caracterización térmica del polímero mediante análisis DSC evidenció biodegradación en los sistemas de compostaje sintético. Se observó la pérdida de la transición vítrea, así como una reducción tanto en la entalpía como en la temperatura pico de fusión, lo cual confirma una alteración estructural del material durante el proceso.
13. La caracterización térmica del polímero mediante análisis DSC en los sistemas de compostaje Takakura no registró desplazamientos en las temperaturas pico de fusión y se mantuvieron los dos eventos endotérmicos característicos del material. No obstante, se detectó una leve degradación, evidenciada por la disminución en la energía requerida para las transiciones térmicas, lo que sugiere una afectación parcial en la estructura del polímero.
14. El material experimentó transformaciones estructurales durante el compostaje en ambos sistemas (sintético y Takakura). El análisis de los espectros infrarrojos (FT-IR) evidenció una reducción en la absorbancia en la banda correspondiente a 1750 cm^{-1} , asociada al grupo carbonilo del polímero, así como alteraciones en las regiones amorfa (921 cm^{-1}) y cristalina (957 cm^{-1}). Estas modificaciones son indicadores del proceso de biodegradación.
15. El análisis termogravimétrico (TGA) mostró una disminución en la temperatura crítica de degradación del polímero tanto en el compost sintético como en el Takakura. Esta reducción es un indicador de la biodegradación del material, ya que refleja una pérdida en la estabilidad térmica como consecuencia de las alteraciones en la estructura molecular durante el compostaje.
16. Los análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitieron evidenciar una degradación clara del polímero en los sistemas de compostaje sintético a la sexta semana, observándose fragmentación a nivel microscópico. En el caso del compostaje Takakura, las imágenes SEM revelaron el inicio del deterioro estructural del material, manifestado en forma de grietas y pandeos superficiales.
17. Durante el proceso de compostaje no fue posible realizar pruebas de caracterización mediante análisis dinámico-mecánico (DMA), debido a la falta de uniformidad en las muestras, lo que impidió la obtención de resultados representativos. No obstante, a partir de las observaciones sensoriales se concluyó que el polímero sometido al compostaje sintético presentó una pérdida notable de flexibilidad, tornándose frágil. En contraste, el PLA expuesto al sistema Takakura, aunque evidenció una disminución en sus propiedades físico-mecánicas, conservó cierto grado de ductilidad.
18. El porcentaje de degradación del material (D %) es diferente según las propiedades físico-mecánicas tanto en el compost sintético como en el Takakura. El PLA presentó una desintegración del 4,41 % en el Takakura, mientras que en el compostaje sintético alcanzó una biodegradación del 100 %.
19. Ambos tipos de compost presentaron concentraciones de Fe, Cu, Zn y Mn superiores a los umbrales óptimos, lo cual podría resultar tóxico para el desarrollo de los cultivos.
20. El micronutriente B presentó una deficiencia en ambos sistemas de compostaje (sintético y Takakura), lo que podría comprometer el desarrollo radicular de las plantas.
21. La conductividad eléctrica (CE) en el compost Takakura excedió los valores recomendados, registrando $20,8\text{ mS/cm}$ en el tratamiento control y $25,8\text{ mS/cm}$ en el tratamiento con PLA, cuando el límite sugerido es $\leq 8\text{ mS/cm}$. Este exceso puede afectar negativamente la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.
22. Se determina que los abonos procedentes de todos los tratamientos de compostaje se clasifican como *Abono Clase B*, de acuerdo con los criterios de calidad establecidos. Esta categoría corresponde a productos de calidad intermedia, que presentan ciertas restricciones para su uso directo en suelos agrícolas.
23. La presencia de PLA en los sistemas de compostaje sintético y Takakura no generó diferencias significativas en comparación con sus respectivos controles. Aunque se

identificaron algunas variaciones entre el compost Takakura con PLA y su control, estas no pueden atribuirse directamente a la biodegradación del polímero, dado que en este sistema el porcentaje de degradación fue inferior al 5 %. Por lo tanto, se considera que el PLA no tuvo efecto en la dinámica del compostaje ni en la calidad final del abono obtenido en ambos sistemas evaluados.

24. Los análisis de fitotoxicidad demostraron que el compost sintético generado a partir de la biodegradación del PLA de 40 μm no solo es viable como enmienda orgánica, sino que además favorece el desarrollo de las plántulas en comparación con la tierra comercial. Las plantas cultivadas con este compost presentaron mayor vigor, evidenciado en tallos más gruesos y un desarrollo foliar superior. Estos resultados, respaldados por las pruebas de calidad del abono, permiten clasificar al compost sintético como un Abono Clase B.
25. Se sugiere usar el compost sintético en una proporción de 25 % mezclado con 75 % de tierra comercial, a fin de optimizar su efectividad y minimizar posibles efectos negativos sobre el desarrollo vegetal.
26. La aplicación del compost Takakura como enmienda orgánica generó efectos fitotóxicos en las plántulas de arroz. Esta fitotoxicidad se manifestó en un mayor número de pérdidas de plántulas durante la siembra y en el desarrollo de raíces, tallos y hojas más cortos, delgados y frágiles. En consecuencia, se obtuvo una menor producción de biomasa al final. La reducción de biomasa se asocia con la disminución en el número de plantas establecidas y su baja calidad fisiológica, atribuible a las condiciones adversas generadas por las características del compost Takakura.
27. La germinación de las semillas de cebolla se vio afectada debido a las altas temperaturas ambientales, posiblemente agravadas por el cambio climático y el efecto de isla de calor urbana en Pavas.

8. RECOMENDACIONES

1. Ampliar la evaluación de la biodegradabilidad y compostabilidad a otros materiales de empaque, así como a diferentes espesores de PLA, con el fin de fortalecer el plan regulatorio nacional en torno a los plásticos compostables.
2. La exploración de diversos tipos de sistemas de compostaje, con el objetivo de identificar en cuáles de ellos los empaques de PLA pueden biodegradarse eficazmente, bajo diferentes condiciones ambientales y operativas.
3. Dado que las condiciones climáticas de las instalaciones del LANOTEC no resultaron adecuadas para la germinación de la cebolla, se sugiere no utilizar esta especie en futuras pruebas de fitotoxicidad. En su lugar, se recomienda seleccionar cultivos sensibles a la fitotoxicidad del suelo, pero que posean una mayor tolerancia a temperaturas elevadas.
4. La incorporación de un análisis de la actividad microbiana para identificar qué microorganismos están presentes en los sistemas de compostaje y cómo interactúan con los polímeros evaluados, ya que es fundamental considerar el biosistema completo que incluya el empaque, el sustrato, la planta, las condiciones ambientales y la actividad microbiana.
5. Se sugiere priorizar los sistemas de compostaje sintéticos en un estudio que incluya la microbiología, ya que al estar normados y estandarizados, permiten obtener resultados más consistentes y comparables; por lo tanto, con menor sesgo.
6. El desarrollo de técnicas complementarias como el uso de respirómetros y análisis metagenómicos, para una evaluación más integral y precisa de la biodegradación de biopolímeros en condiciones controladas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, Y., Prieto, A. & Rosales, Y. (2019). Dinámica de carbono y nitrógeno en suelos tratados con residuos orgánicos. *Revista Electrónica Multidisciplinaria de Ciencias Básicas, Ingeniería y Arquitectura*. 1 (1). <https://portal.amelica.org/ameli/journal/264/2641278001/html/>.
- Amigo, J. A. (2018). Tiempo de germinación y crecimiento de la cebolla. <https://www.mundohuerto.com/cultivos/cebolla/tiempo-crecimiento-cebolla>.
- Andrade, B. R., Rivera, M. A. & Guzmán, H. L. (2018). El empaque como oportunidad para el desarrollo del producto y el consumidor responsable; una mirada desde la industria en Norteamérica y Suramérica. *Saber, Ciencia y Libertad*. 13 (1). 164-179. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2018v13n1.2558>.
- Armelin-Diggroc, E., Franco-García, L., Lopez-Peña, I., Puiggalí-Bellalta, J. & Saperas-Plana, N. (2020). Tema 5: Caracterización de polímeros empleando técnicas de espectroscopía infrarroja (FTIR) y resonancia magnética nuclear (RMN), *Experimentación e Instrumentación. Cuaderno de prácticas (Código: 295EQ221)* (pp. 40-51). Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE-UPC), Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelonatech. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/178920/CUADERNO%20DE%20PRÁCTICAS%20Exp%20&%20Instrumentación_\[2020\].pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/178920/CUADERNO%20DE%20PRÁCTICAS%20Exp%20&%20Instrumentación_[2020].pdf).
- Arroyave Sierra, O. J., Chamorro Rengifo, J. & Ochoa Muñoz, A. F. (2019). Crecimiento de larvas de mosca soldado alimentadas con gallinaza, porcínaza y alimento para ponedoras. *Revista colombiana de ciencia animal recia*. 11 (2). <https://doi.org/10.24188/recia.v11.n2.2019.730>.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2001). *Normalización AE de Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje. (UNE-EN 13432:2000)*.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (2006). *Organización Internacional de Normalización. Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un laboratorio. (UNE-EN ISO 20200:2004)*.
- Baghel, R. (2025). *Tamaño y participación del mercado de plásticos biodegradables, pronósticos de crecimiento para 2037*. Research Nester. <https://www.researchnester.com/es/reports/biodegradable-polymers-market/6647>.
- Beltrán-Morales, F. A., Nieto-Garibay, A., Murillo-Chollet, J. S. A., Ruiz-Espinoza, F. H., Troyo-Díeguez, E., Alcalá-Juaregui, J. A. & Murillo-Amador, B. (2020). Contenido inorgánico de nitrógeno, fósforo y potasio de abonos de origen natural para su uso en agricultura orgánica. *Revista Terra Latinoamericana*, 37 (4). <https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.520>.
- Bermudez Serrano, I. M. & Sánchez Velázquez, O. A. (2023). Aprovechamiento integral de la Mosca Soldado Negra: Bioconversión, sostenibilidad y desafíos emergentes. *Scientia Agropecuaria*. 14 (4). http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172023000400012
- Borrero González, G. P. (2014). *Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico*. [Tesis de graduación de Magister, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <http://163.178.205.27:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/67/TFG%20Gina%20Borrero%20Final%20aprobado%20firmas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Borrero-González, G. P., Arias-Aguilar, D., Campos-Rodríguez, R. & Pacheco-Rodríguez, F. (2016). Comparative study on the use of two substrates with microbial inoculants for organic solid waste domestic composting: Economic Analysis. *Tecnología en Marcha*. 29 (1). 28-37. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/2536/2325.

- Camacho, A. D., Martínez, L., Ramírez Saad, H., Valenzuela, R. & Valdés, M. (2014). Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos. *Terra Latinoamericana*. 32 (4).
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792014000400291&script=sci_arttext&utm_source=chatgpt.com#B9.
- Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L. & Jiménez-Morales, M. F. (2016). Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras. *Revista Tecnología en Marcha*. 29 (8). 25-32.
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822016000900025.
- Castro-Hernández, F., Navarro-Flores, J. R. & Castro-Baquero, L. (2023). Adición de inóculos microbianos y condiciones optimizadas de elaboración en un compost comercial. *Agronomía Costarricense*, 47 (2).
<http://dx.doi.org/10.15517/rac.v47i2.56130>.
- Castroviejo-Fernández, M. P. (2020). Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientificotecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb>.
- Chavarría, M., & Fonseca, C. (2006). *Cultivo de cebolla en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía.
- Chaves-Arias, R., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L. & Jiménez-Morales, M. F. (2019). Compostaje de residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 32 (1). 39-53.
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822019000100039.
- Condori-Nina, A. (2022). *Microorganismos eficientes en la mejora de la calidad del compost: una revisión sistemática de los últimos 5 años*. [Tesis de graduación, Universidad César Vallejo].
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/104832/Condori_NA%20-%20SD.pdf?sequence=1.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Agrosavia. (s.f.). Servicio de análisis químico de abonos orgánicos.
<https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/ofertatecnologica/l%C3%ADnea-agr%C3%ADcola/cacao/servicios-de-laboratorio/368-servicio-de-analisis-qu%C3%ADmico-de-abonos-org%C3%A1nicos>.
- Delgado-Arroyo, M. M., Mendoza-López, K. L., González, M. I., Tadeo-Lluch, J. L. & Martín Sánchez, J. V. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 35 (4). <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15>.
- Durand-Chavez, J. W. (2023). *Eficiencia en la producción de compost empleando bacterias ácido lácticos (Lactobacillus) y bacterias actinomicetos (Streptomyces) en residuos orgánicos*. [Tesis de graduación, Universidad César Vallejo].
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/136190/Durand_CJW-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Earth Action. (2024). *Plastic Overshoot Day 2024: Global Waste Crisis Surpasses Capacity*.
https://www.safefoodadvocacy.eu/plastic-overshoot-day-2024-global-waste-crisis-surpasses-management-capacity/?utm_source=chatgpt.com.
- Fukuzaki, H., Yoshida, M., Asano, M. & Kumakura, M. (1989). Synthesis of copoly (D, L-lactic acid) with relative low molecular weight and in vitro degradation. *European Polymer Journal*. 25 (10). 1019 - 1026.
[https://doi.org/10.1016/0014-3057\(89\)90131-6](https://doi.org/10.1016/0014-3057(89)90131-6).

- García-Céspedes, D., Lima-Cazorla, L., Ruíz-Gutiérrez, L. & Calderón-Peñalver, P. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*. 26. https://cdn.blueberriesconsulting.com/2015/07/pdf_000202.pdf.
- Giełdowska, M., Puchalski, M., Sztajnowski, S. & Krucińska, I. (2022). Evolution of the Molecular and Supramolecular Structures of PLA during the Thermally Supported Hydrolytic Degradation of Wet Spinning Fibers. *Macromolecules*, 55 (22). 10100-10112. DOI: 10.1021/acs.macromol.2c01778.
- Gómez-Serrano, E., Gutiérrez-Sánchez, M. & Ruíz-Cortes, A. (2022). *Programa de aprovechamiento de residuos orgánicos domiciliarios para el municipio de Liberia a través del método de compostaje Takakura: plan piloto con actores claves del barrio Pueblo Nuevo, en el año 2022*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/dfd7fe50-40bf-461b-879d-bd4427d1857d/content>.
- González-Jiménez, Y. & Villalobos-Morales, J. (2021). Manejo ambiental de residuos orgánicos: estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite. *Tecnología en Marcha*. 34 (2). 11-22. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4843>.
- Hidalgo-Ruiz, E. (2012). *Evaluación de un empaque biodegradable a partir de almidón modificado de yuca (Manihot esculenta Crantz.) Con adición de capsaicina, sobre el desarrollo del fruto de plátano Dominico Hartón (Musa AAB SIMMONDS)*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Cauca, Colombia]. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/810>
- Higa, T. & Parr, J. F. (1994). Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment. *International Nature Farming Research Center Atami, Japón*. <https://www.bokashi.se/dokument/bibliotek/EM.pdf>.
- Huamán-Carranza, M. (2019). Concentración de nitrógeno, fósforo, potasio y calcio en el compost producido a partir de residuos sólidos orgánicos de mercados populares y residencias de Huaraz-Ancash. *Aporte Santiaguino*, 12 (2). 264 - 277. <https://doi.org/10.32911/as.2019.v12.n2.647>.
- Inostroza-Blancheteau, C. & Gonzalez-Villagra, J. (2020). Boro: un micronutriente crucial para el desarrollo de las plantas y la calidad de la fruta en especies hortofrutícolas. *Revista Campo & Tecnología*. (16). 26-29. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/b3c77ac8-a74c-45b2-8462-dadd30cd55b6/content>.
- Instituto de Estrategias Ambientales Globales (IGES). (2010). Compostaje para la reducción de residuos. https://www.jica.go.jp/kyushu/office/ku57pq000009v1mcatt/comp_kit_low.pdf.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2015). *Manual técnico para la producción de cebolla en clima tropical*. San José, Costa Rica: IICA.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2021). Efectos del cambio climático en zonas urbanas: fenómeno de isla de calor urbana. San José, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE).
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2024). Anuario Estadístico 2022 - 2023. Compendio de estadísticas nacionales. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC).
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2005). NCh2880 Norma Chilena Oficial. Compost Clasificación y requisito. Santiago, Chile.
- Japan International Cooperation Agency (JICA). (s.f.). Environmental Management (JICA Clean City Initiative). Takakura Composting Method. https://www.jica.go.jp/english/our_work/thematic_issues/management/study_takakura.html.

- Lalander, C., Ermolaev, E., Wiklicky, V., & Vinnerås, B. (2020). Process efficiency and ventilation requirement in black soldier fly larvae composting of substrates with high water content. *Science of The Total Environment*. 729 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138968>.
- Li, R. Y., Liu, Z. G., Liu, H. Q., Chen, L., Liu, J. F. & Pan, Y. H. (2015). Evaluation of biocompatibility and toxicity of biodegradable poly (DL-lactic acid) films. *American Journal of Translational Research*. 7 (8). 1357-1370. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4568792/?utm_source=chatgpt.com.
- Li, G., Zhao, M., Xu, F., Yang, B., Li, X., Meng, X., Teng, L., Sun, F., & Li, Y. (2020). Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(21), 5023. <https://doi.org/10.3390/molecules25215023>.
- López-Bravo, E., Andrade-Rivera, A. J., Herrera-Suárez, M., Gonzalez-Cueto, O. & Garcia de la Figal-Costales, A. (2017). Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña. *Revista Centro Agrícola*, 44 (3). 49 - 55. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v44n3/cag07317.pdf>.
- López-Tolentino, G., Muñoz-Osorio, G. A., Marín-Collí, E. E., Castillo-López, E. & Jiménez Chi, J. A. (2022). Composta artesanal sola o con microtúnel sobre el crecimiento y rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista de investigación y difusión científica agropecuaria*, 26. 235 - 244. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.27>.
- Martinez Aguilar, L. G. (2006). Técnicas de análisis dinámico mecánico. [Trabajo final de graduación de Especialista en Química Aplicada, Centro de Investigación en Química Aplicada de México]. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/464/1/Lizeth%20Georgina%20Martinez%20Aguilar.pdf>
- Martin, E. (2017). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. ¿Cuándo?. *College of Agriculture and life Sciences, University of Arizona*. https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1220s-2017_0.pdf
- Malvern Panalytical. (s.f.). Calorimetría de barrido diferencial (DSC). <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/microcalorimetry/differential-scanningcalorimetry#:~:text=La%20calorimetr%C3%ADa%20de%20barrido%20diferencial,c alienta%20a%20un%20ritmo%20constante>.
- Manals-Cutiño, E., Penedo-Medina, M. & Giralt-Ortega, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. *Tecnología Química*, 31 (2). 36-43. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543773005>.
- Meneses, G. & Aguilar-Calle, S. (2022). Mejores usos del plástico tipo PLA con alternativas ambientales y agrícolas. *SUCRE REVIEW*. 2 (2). https://ojs.estudiantesucre.edu.ec/index.php/sucre_review/article/view/22.
- Mettler Toledo (s.f.). Análisis termogravimétrico (TGA). https://www.mt.com/es/es/home/library/on-demand-webinars/lab-analyticalinstruments/Thermogravimetric_Analysis.html.
- Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud, Fundación MarViva, Fundación CRUSA, & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2017). *Estrategia Nacional para Sustituir el Consumo de Plásticos de un Solo Uso por Alternativas Renovables y Compostables*. Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA). https://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_sustitucion_plastico_de_un_solo_uso.pdf.
- Ministerio de la Presidencia de España. (2013). Real Decreto 506/2013. *Boletín Of. del Estado*, 164 (I). 51119 - 51207. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506>.

- Ministerio de Salud de Costa Rica. (2016). *Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR) 2016-2021*. <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos-left/documentos-ministerio-de-salud/ministerio-de-salud/planes-y-politicas-institucionales/planes-institucionales/estrategias-planes-institucionales/729-estrategia-nacional-de-reciclaje-2016-2021/file>.
- Mora-Perez, A. M. & Garro-Molina, D. (s.f.). Climatología Aeronáutica 2005-2024. Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/38326/Climatolog%C3%ADa+del+Aeropuerto+Tob%C3%ADas+Bola%C3%B1os+%28Pavas%29/58c11590-21ce-4646-a0d9-cbfc8c40ccd2>.
- Morocho, M. T. & Leiva Mora, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola*, 46 (2). http://www.scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000200093.
- Murillo-Vargas, F., Jimenez-Villalta, G., Esquivel-alfaro, M. & Vega-Baudrit, J. R. (2020). Ácido L-poliláctico (PLA) y nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) con potenciales aplicaciones industriales. *Revista Colombiana de Química*, 50 (1). 20-39. <https://www.redalyc.org/journal/3090/309066297003/html/>.
- Naciones Unidas (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf.
- Navia, D. P. & Villada, H. C. (2013). Impacto de la investigación en empaques biodegradables en ciencia, tecnología e innovación. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 11 (2), 173-180. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n2/v11n2a20.pdf>.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455), 1 – 24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD). (2006). OECD Test Guideline 208: Terrestrial Plant Test - Seedling Emergence and Seedling Growth Test.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD). (2022). La contaminación por plástico crece sin cesar, en tanto que la gestión de residuos y el reciclaje se quedan cortos, dice la OCDE. <https://www.oecd.org/espanol/noticias/perspectivas-globales-del-plastico.htm>.
- Ortiz-Gómez, V., Velasco, R., Fernandez, A., Enriquez, M. & Roa, D. (2015). Obtención de una película a base de almidón hidroxipropilado producida por extrusión soplado. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 13 (1). 90-98. https://www.researchgate.net/publication/283523488_Obtencion_de_una_película_a_base_de_almidon_hidroxipropilado_producida_por_extrusion_soplado.
- Pardo, L., Menéndez, J., & Giraudo, M. (2011). Envases biodegradables: una necesidad de compromiso. *La alimentación latinoamericana*. (292), 42-44. <http://www.publitem.com.ar/contenido/objetos/Envasesbiodegradables.pdf>.
- Parra-Huertas, R. A. (2010). Bacterias ácido lácticas: papel funcional en los alimentos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 8 (1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612010000100012.
- Pérez-García, A., Rodríguez-Méndez, M. L. & Salvo-Comino, C. (2021). *Caracterización de leches mediante ATR FT-IR combinado con técnicas quimiométricas*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/48015/TFG-I-1962.pdf?sequence=1>.
- Pranamuda, H. & Tokiwa, Y. (1992). Degradation of poly (l-lactide) by strains belonging to genus *Amycolatopsis*. *Biotechnology Letters*. 21. 901 - 905. <https://doi.org/10.1023/A:1005547326434>.

- Pranamuda, H., Tokiwa, Y. & Tanaka, H. (1997). Polylactide degradation by an Amycolatopsis sp. *Applied and Environmental Microbiology*. 63. 1637- 1640. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16535586/>.
- Ramírez-Ramírez, F., Campos-Rodríguez, R., Jiménez-Morales, M. F. & Brenes-Peralta, L. P. (2016). Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento para el cultivo de lechuga en huertas caseras de Guácimo, Limón. *Revista Tecnología en Marcha*. 29 (8). 14-24. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/2981.
- Ribba, L., Ochoa-Yepes, O., Díaz, E. D. & Goyanes, S. (2020). Alternativas a los plásticos convencionales. Las dos caras de los plásticos verdes. *Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 42-57. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/146144/CONICET_Digital_Nro.36af671c-25fa-41d5-b475-21744a77982c_B.pdf?sequence=5&isAllowed=y.
- Rivera, C., Contreras, F., Ariza, W., Bonilla, S. & Cruz, A. (2019). Los empaques biodegradables, una respuesta a la consciencia ambiental de los consumidores. *Realidad Empresarial*. (7), 2–8. <https://doi.org/10.5377/reuca.v0i7.7830>.
- Rives-Castillo, S., Bautista-Baños, S., Correa-Pacheco, Z. N. & Ventura-Aguilar, R. I. (2020). Situación actual de los envases utilizados para la conservación postcosecha de productos hortofrutícolas. *Revista Iberoamericana de Tecnología y Postcosecha*. 21 (1). <https://www.redalyc.org/journal/813/81363356002/81363356002.pdf>.
- Román, P., Martínez, M. M. & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor, experiencias en América Latina. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/86a00877-877d-4fa7-8608-32071e1464d8/content>.
- Romero-Conrado, A. R., Suárez-Agudelo, E. A., Macías-Jiménez, M. A., Gómez-Charris, Y. & Lozano-Ayarza, L. P. (2017). Diseño experimental para la obtención de compost apto para uso agrícola a partir de lodo papelerero Kraft. *Espacios*. 38 (28). <https://www.revistaespacios.com/a17v38n28/a17v38n28p01.pdf>.
- Ruiz, M., Pastor, K. & Acevedo, A. (2013). Biodegradabilidad de artículos desechables en un sistema de composta con lombriz. *Información Tecnológica*. 24 (2). 47-56. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000200007.
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*. 26, (3). 246 - 265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.
- Secretaría del Consejo Nacional Ambiental. (2020). I Plan Nacional de Compostaje 2020-2050. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/05/Plan-Nacional-de-Compostaje-2020-2050.pdf>.
- Segura-Rodríguez, K. (2023). *Evaluación de biopolímeros utilizados para empaque de alimentos empleados en condiciones de compostaje casero*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/07/TFG-KevinSegura.pdf>.
- Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad (SINEC). (2016). Análisis de agua.- medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba- (cancela a la NMX-AA-008- SCFI-2011). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>.
- Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) (2023). ASTM D6400. Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities. <http://www.astm.org/Standards/D6400.htm>.

- Solano, G., Rojas-Gätjens, D., Rojas-Jiménez, K., Chavarría, M. & Romero, R. M. (2022). Biodegradation of plastics at home composting conditions. *Environmental Challenges*. 7. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100500>.
- Sullivan, D. M., Bary, A. I., Miller, R.O., & Brewer, L. J. (2018). Interpreting Compost Analyses. *Oregon State University Extension Serv. Interpret.*, 14 (1). 18 – 22. <https://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/em9217.pdf>.
- Surendra, K.C., Tomberlin, J.K., Van Huis, A., Cammack, J.A., Heckmann, L.H.L., & Khanal, S.K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.))(Diptera: Stratiomyidae)(BSF). *Waste Management*. 117, 58-80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>.
- Tijeras Martínez, R. (2017). *Cuantificación de bioplásticos en cianobacterias cultivadas en un sistema de depuración de agua residual*. [Tesis de graduación, UPC BarceloneTech, España]. <http://hdl.handle.net/2117/101950>.
- Tomita, K., Kuraki, Y. & Nagai, K. (1999). Isolation of thermophiles degrading poly (L-lactic acid). *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 87 (6). 752 - 755. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(99\)80148-0](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(99)80148-0).
- Torres A, Li S, Roussos S, Vert M. (1996). Screening of microorganisms for biodegradation of poly (lactic acid) and lactic acid-containing polymers. *Applied and Environmental Microbiology*. 62 (7). 2393–2397. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8779578/>.
- Torrez Sequeira, Y. E. (2023). *Caracterización del proceso y calidad del compost obtenido de la degradación de materiales poliméricos biodegradables a través del compostaje, utilizados para el empaque de alimentos (PLA y PBAT)*. [Tesis de graduación de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wpcontent/uploads/2023/03/TFG-YeymiTorrez.pdf>.
- Trofimchuk, E., Ostrikova, V., Ivanova, O., Moskvina, M., Plutalova, A., Grokhovskaya, T., Shchelushkina, A., Efimov, A., Chernikova, E., Zhang, S., & Mironov, V. (2023). Degradation of Structurally Modified Polylactide under the Controlled Composting of Food Waste. *Polymers*, 15 (19), 4017. <https://doi.org/10.3390/polym15194017>.
- Vargas-Sánchez, A., Trujillo-Ortega, M. E., Reyes-Sánchez, L. B. & Mendoza-Elvira, S. E. (2020). Uso de un inóculo endógeno para acelerar la degradación de materia orgánica en una granja porcina por medio del proceso de compostaje. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 36 (4). <https://doi.org/10.20937/rica.53416>.
- Zaiontz, C. (s.f.-a). *Basic concepts for ANOVA*. Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/one-way-analysis-of-variance-anova/basic-concepts-anova/>.
- Zaiontz, C. (s.f.-b). *Dunn's Test for Multiple Comparisons*. Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/non-parametric-tests/kruskal-wallis-test/dunns-test/>.
- Zaiontz, C. (s.f.-c). *Kruskal-Wallis Test*. Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/one-way-analysis-of-variance-anova/kruskal-wallis-test/>.
- Zaiontz, C. (s.f.-d). *Levene's Test*. Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/one-way-analysis-of-variance-anova/homogeneity-variance-s/levenes-test/>.
- Zaiontz, C. (s.f.-e). *Shapiro-Wilk Original Test*. Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/tests-normality-and-symmetry/statistical-tests-normality-symmetry/shapiro-wilk-test/real-statistics.com>.
- Zhao, Q., Fang, Z., Wang, P., Qian, Z., Yang, Y., Ran, L., Zheng, J., Tang, Y., Cui, X., Li, Y., Zhang, Z. & Jiang, H. (2025). Polylactic Acid Micro/Nanoplastic Exposure Induces Male Reproductive Toxicity by Disrupting Spermatogenesis and Mitochondrial Dysfunction in Mice. *American Chemical Society (ACS) Nano*. 19, (5). 5589 - 5603. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15112>.

10. APÉNDICES

Apéndice 1

Ejemplo del cálculo de las Ecuación 1 y 2, % CH y % Ms respectivamente, de los componentes para elaborar compost sintético

Contenido de humedad aserrín (%)	Masa seca aserrín (%)
$\% CH \text{ aserrín} = 100 \times \frac{M_{H \text{ aserrín}} - M_{S \text{ aserrín}}}{M_{H \text{ aserrín}}}$	$\% MS \text{ aserrín} = 100 \times \frac{M_{S \text{ aserrín}}}{M_{H \text{ aserrín}}}$
$\% CH \text{ aserrín} = 100 \times \frac{8,41 - 7,90}{8,41}$	$\% MS \text{ aserrín} = 100 \times \frac{7,90}{8,41}$
$\% CH \text{ aserrín} = 6,10 \%$	$\% MS \text{ aserrín} = 93,90 \%$

Ejemplo del cálculo de las Ecuación 3, MS de los componentes para elaborar compost sintético

$$\begin{aligned} MS \text{ aserrín} &= \text{Masa matriz} \times \% MS \text{ matriz} \times \% \text{Componente} \\ MS \text{ aserrín} &= 20 \text{ kg} \times 45 \% \times 40 \% \\ MS \text{ aserrín} &= 3,60 \text{ kg} \end{aligned}$$

Ejemplo del cálculo de las Ecuación 4, MH de los componentes para elaborar compost sintético

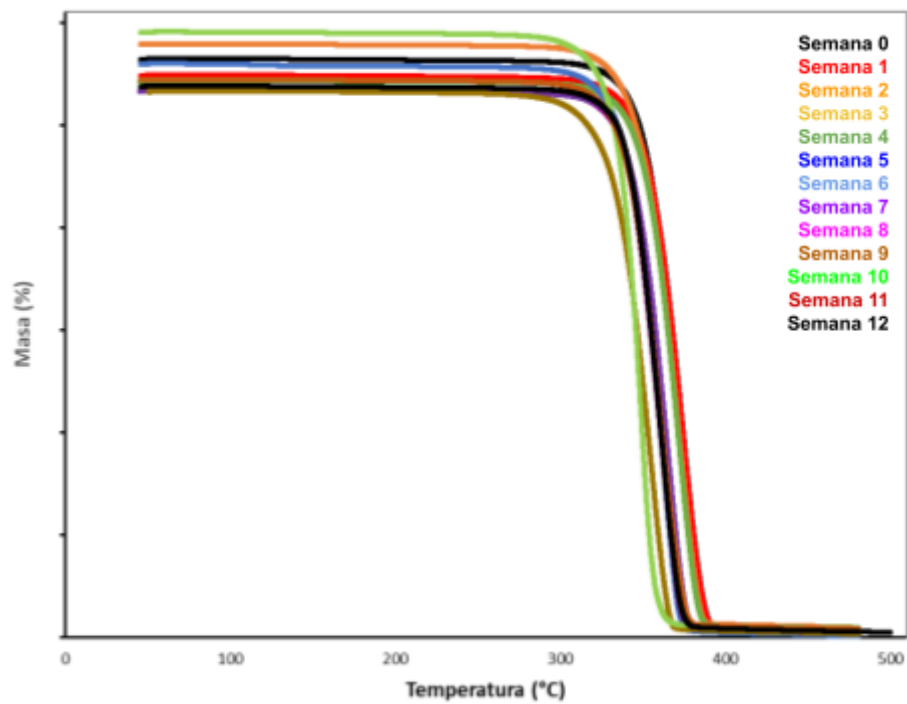
$$\begin{aligned} MH \text{ aserrín} &= MS \text{ aserrín} + (MS \text{ aserrín} \times \% CH \text{ aserrín}) \\ MH \text{ aserrín} &= 3,60 \text{ kg} + (3,60 \text{ kg} \times 2,75 \%) \\ MH \text{ aserrín} &= 3,60 \text{ kg} + 0,0988 \text{ kg} \\ MH \text{ aserrín} &= 3,70 \text{ kg} \end{aligned}$$

Ejemplo del cálculo de las Ecuación 5, tolerancia en la diferencia entre los valores teóricos y reales, de los componentes para la elaboración del compost sintético

$$\begin{aligned} \text{Tolerancia componente (\%)} &= \left| \frac{MH \text{ real} - MH \text{ teórica}}{MH \text{ real}} \right| \times 100 \\ \text{Tolerancia componente (\%)} &= \left| \frac{MH \text{ real aserrín} - MH \text{ teórica aserrín}}{MH \text{ real aserrín}} \right| \times 100 \\ \text{Tolerancia componente (\%)} &= \left| \frac{3,72 \text{ kg} - 3,70 \text{ kg}}{3,72 \text{ kg}} \right| \times 100 \\ \text{Tolerancia componente (\%)} &= 0,646 \% \end{aligned}$$

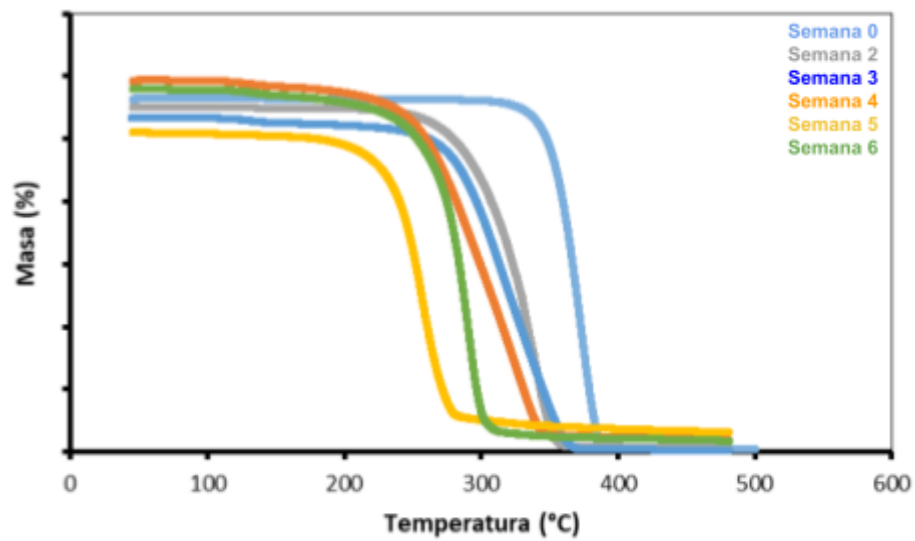
Apéndice 2

Análisis termogravimétrico del PLA de 40 μ m a través del tiempo en el compost Takakura



Apéndice 3

Análisis termogravimétrico del PLA de 40 μ m a través del tiempo en el compost sintético



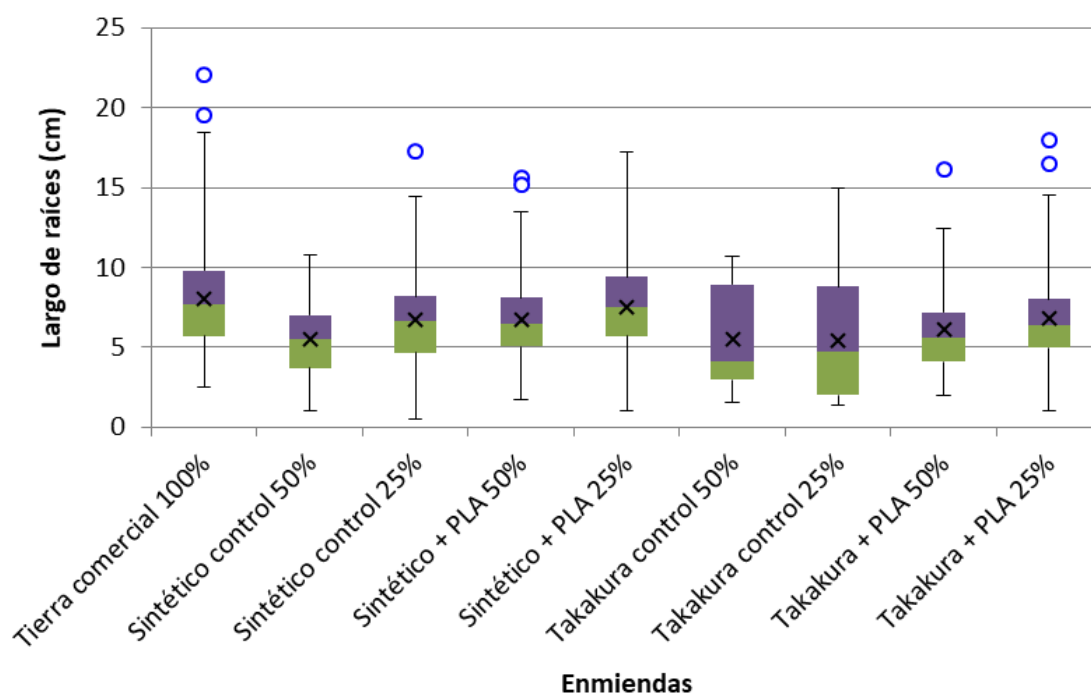
Apéndice 4

Resultados de la germinación (%) y biomasa (g) de los análisis de fitotoxicidad para el arroz en condiciones de laboratorio

Tratamiento	Germinación		Número de pérdidas	Biomasa cosechada (g)
	Número	(%)		
Tierra comercial	140	-	0	78,80
Takakura PLA 50 %	155	4,03	62	25,00
Takakura PLA 25 %	163	9,40	3	102,50
Takakura control 50 %	73	-51,01	45	9,80
Takakura control 25 %	34	-77,18	12	7,00
Sintético PLA 50 %	175	17,45	1	153,50
Sintético PLA 25 %	165	10,74	0	164,20
Sintético control 50 %	163	9,40	13	110,10
Sintético control 25 %	175	17,45	0	217,00

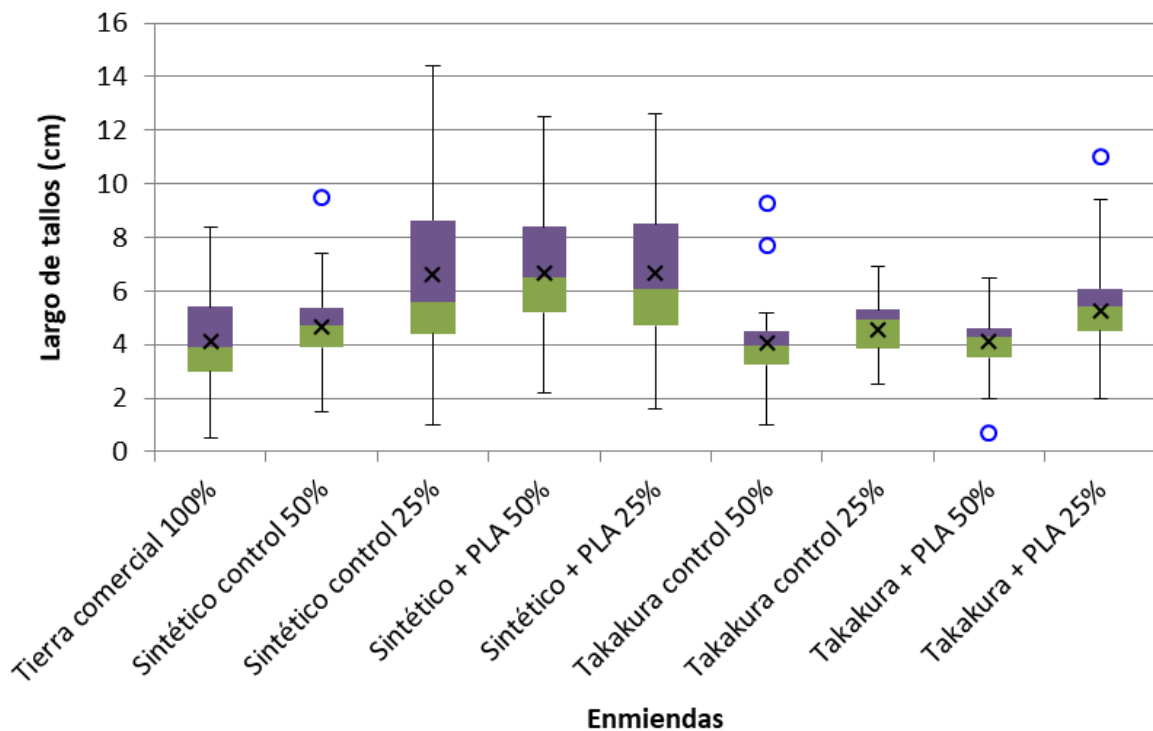
Apéndice 5

Gráfico de cajas para la prueba de fitotoxicidad de los abonos en arroz en el parámetro que corresponde al largo de las raíces



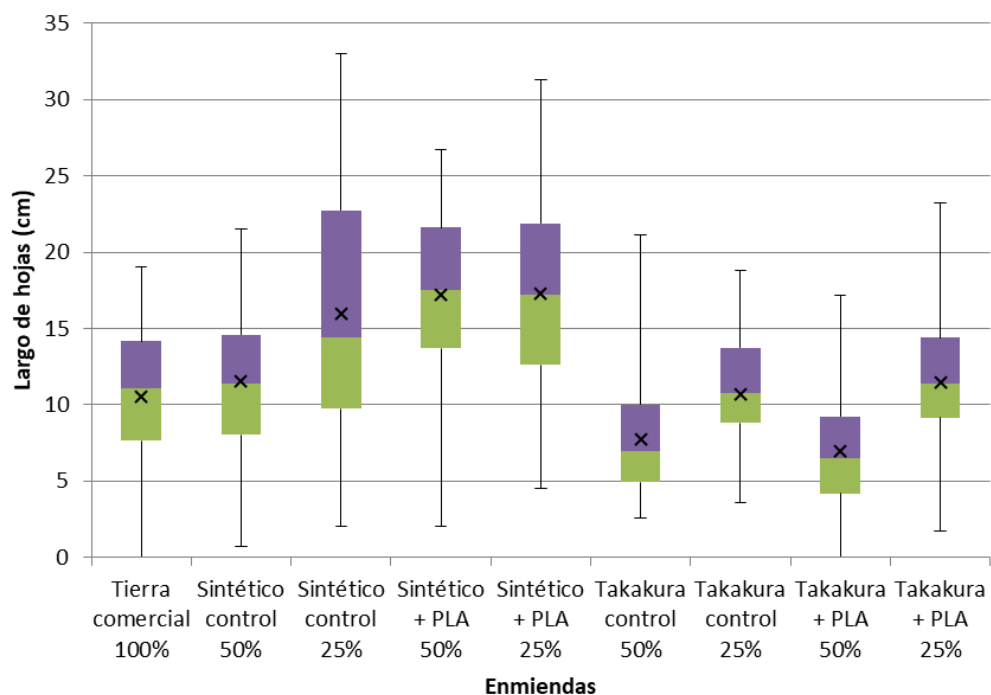
Apéndice 6

Gráfico de cajas para la prueba de fitotoxicidad de los abonos en arroz en el parámetro que corresponde al largo de los tallos



Apéndice 7

Gráfico de cajas para la prueba de fitotoxicidad de los abonos en arroz en el parámetro que corresponde al largo de las hojas



11. ANEXOS

Anexo 1

Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) apoyados en la presente investigación (Naciones Unidas, 2018)

ODS	Metas del objetivo
2. Hambre cero	- Fomentando insumos de producción y conocimientos. - Oportunidades de añadir valor en las cadenas de producción. - Asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos. - Aplicar prácticas agrícolas resilientes. - Contribuir al mantenimiento de los ecosistemas. - Fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático. - Mejorar progresivamente la calidad de la tierra y el suelo. - Aumentar las inversiones en investigación y servicios agrícolas. - Desarrollar tecnologías agrícolas. - Adopción de medidas para asegurar el buen funcionamiento de los mercados de productos alimentarios y sus derivados, facilitando el acceso oportuno a la información.
3. Salud y bienestar	- Reducción de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la polución y contaminación del aire, el agua y el suelo.
4. Educación de calidad	- Asegurar que todas las personas tengan los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible.
6. Agua limpia y saneamiento	- Reducción de la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, al aumentar el reciclado y la reutilización sin riesgos. - Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.
8. Trabajo decente y crecimiento económico	- Lograr niveles más elevados de productividad mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, al brindar valor añadido. - Mejorar progresivamente la producción y el consumo eficiente de los recursos y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente.
9. Industria, innovación e infraestructura	- Convertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficiencia y promoviendo la adopción de tecnologías y progresos industriales limpios y ambientalmente racionales.

Anexo 1

Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) apoyados en la presente investigación (Continuación) (Naciones Unidas, 2018)

ODS	Metas del objetivo
11. Ciudades y comunidades sostenibles	- Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad de aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo. - Aumentar la adopción de planes integrados para promover el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él.
12. Producción y consumo responsable	- Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales. - Reducir los desperdicios de alimentos per cápita. - Lograr la gestión ecológicamente racional de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos a la salud humana y el medio ambiente. - Reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. - Alentar a las empresas a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes. - Asegurar que las personas tengan información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible y los estilos de vida en armonía con la naturaleza. - Ayudar a fortalecer la capacidad científica y tecnológica del país para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles.
13. Acción por el clima	- Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales. - Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto a la mitigación del cambio climático, la adaptación a él y la reducción de sus efectos.
14. Vida submarina	- Prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todos los tipos, en particular la producida por actividades realizadas en la tierra.
15. Vida de ecosistemas terrestres	- Asegurar la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres. - Luchar para rehabilitar las tierras y procurar un mundo con efecto neutro a la degradación de las tierras.
17. Alianzas para lograr los objetivos	- Promover el desarrollo de tecnologías ecológicamente racionales y su transferencia, divulgación y difusión.