

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería  
Ambiental

**“Estudio de factibilidad para la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020*:  
*Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de  
compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio, en el CEQIATEC.*”**

Dara Mora Brenes

Cartago, mayo, 2025

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

**ingeniería**  
**ambiental**

**“Estudio de factibilidad para la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020: Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio* en el CEQIATEC”**

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

**Miembros del tribunal**

---

**Ph.D. Mario Araya Marchena**  
**Director(a)**

---

**M.Sc. Dixania Azofeifa Duarte**  
**Lector 1**

---

**M.Sc. Andrea Quesada González**  
**Lector 2**

---

**M.Sc. David Isasi Hernández Parra**  
**Coordinador(a) COTRAFIG**

---

**Dr. Guillermo Calvo Brenes**  
**Director Escuela de Química**

---

**M.Sc. Diana Zambrano Piamba**  
**Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental**

## **DEDICATORIA**

*A Dios, quien me da la fortaleza y sabiduría. A Él le dedico todos mis logros, para su gloria y honra.*

*A mi mamá y mi papá, por su apoyo incondicional, por su gran amor y comprensión.*

*A mi hermana, quien siempre ha estado a mi lado, mi alma gemela.*

*A mi hijo, mi motivación diaria, el que me impulsa a ser mejor cada día.*

*Con todo mi amor y esfuerzo, les dedico este gran logro.*

## AGRADECIMIENTOS

Principalmente, le agradezco a Dios. Me dio la fortaleza, la motivación, la sabiduría e iluminación para culminar esta gran etapa. Su amor inmenso me abraza todos los días y me demuestra su gran bondad en cada paso que doy.

A mi mamá, su amor tan inexplicable y su apoyo estuvieron siempre presente. Gracias a su gran esfuerzo por darme la mejor educación y acompañamiento en todo momento.

A mi papá, por brindarme toda la ayuda necesaria en este proceso y en toda mi vida. Por estar presente de todas las formas posibles, por su esfuerzo y su gran amor.

A mi hermana, por no dejarme sola nunca. Ella es un sueño hecho realidad en mi vida y su compañía y amor fueron un pilar fundamental.

A mi hijo, quien llegó al inicio de esta etapa final. Fue la motivación y la mayor bendición en medio de este proceso. Gracias por acompañarme dentro de mi y a la par mía. Agradezco tu amor inexplicable todos los días.

Al padre de mi hijo, por estar presente y apoyarme.

A mis amigos y amigas a lo largo de toda mi carrera universitaria. Especialmente, a Daniela Mora; gracias por estar presente desde el inicio y convertirte en más que una amiga, gracias por todo el apoyo y compañía.

A mi tutor, Mario Araya, por ser un excelente guía, por su gran disposición en todo momento y su apoyo.

Al CEQIATEC, por darme la oportunidad de llevar a cabo mi TFG y por su colaboración en el desarrollo de esta investigación.

A mis profesores, quienes compartieron sus conocimientos y al Tecnológico de Costa Rica, por ser parte de mi formación como profesional.

## Contenido

<b>1</b>	<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>5</b>
1.1	<i>Objetivos</i> .....	6
1.1.1	Objetivo general.....	6
1.1.2	Objetivos específicos .....	6
<b>2</b>	<b>Revisión de literatura</b> .....	<b>7</b>
2.1	<i>Problemática ambiental del plástico</i> .....	7
2.2	<i>Plásticos no convencionales</i> .....	7
2.2.1	Ácido poliláctico (PLA).....	9
2.2.2	Plásticos oxobiodegradables .....	10
2.3	<i>Compostaje</i> .....	11
2.3.1	Variables del proceso de compostaje .....	13
2.3.1.1	Crecimiento excesivo de hongos .....	15
2.3.1.2	Minimización de olores derivados del compostaje .....	15
2.4	<i>Plásticos no convencionales en Costa Rica</i> .....	16
2.5	<i>Norma INTE/ISO 20200:2020</i> .....	18
2.5.1	Laboratorios acreditados .....	19
2.5.1.1	Proceso de acreditación.....	20
2.6	<i>Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC)</i> 20	
2.7	<i>Estudio de factibilidad</i> .....	21
2.7.1	Aspectos del análisis de factibilidad ambiental .....	22
<b>3</b>	<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>23</b>
3.1	<i>Caracterización del residuo sólido sintético inicial y de los materiales de ensayo para la aplicación del método de la norma INTE/ISO 20200:2020</i> .....	23
3.1.1	Residuo sólido sintético .....	23
3.1.2	Parámetro de diagnóstico para el residuo sólido sintético inicial .....	23

3.1.3	Materiales de ensayo: polímeros.....	24
3.2	<i>Método de ensayo según la norma INTE/ISO 20200:2020</i> .....	25
3.2.1	Preparación del residuo sólido sintético y de los reactores de compostaje .....	25
3.2.2	Preparación de los materiales de ensayo (polímeros) .....	26
3.2.3	Proceso de compostaje según la norma INTE/ISO 20200:2020.....	27
3.2.4	Terminación del método de ensayo .....	28
3.2.5	Parámetros de diagnóstico para el compost final.....	29
3.3	<i>Medición del grado de desintegración de los materiales de ensayo según la norma INTE/ISO 20200:2020 y verificación de su validez</i> .....	29
3.3.1	Cálculo del grado de desintegración .....	29
3.3.2	Cálculo de la disminución en contenido de los sólidos volátiles .....	30
3.3.3	Informe del ensayo.....	30
3.4	<i>Estudio de Factibilidad para la implementación de la norma INTE/ISO 20200:2020 EN EL CEQIATEC</i> .....	31
3.4.1	Estudio preliminar de mercado .....	31
3.4.2	Estudio técnico-operativo .....	31
3.4.3	Estudio ambiental.....	31
3.4.4	Estudio económico.....	33
<b>4</b>	<b>Resultados y discusión</b> .....	<b>35</b>
4.1	<i>Parámetros de diagnóstico durante el proceso de compostaje</i> .....	35
4.1.1	Valoración organoléptica de los reactores durante el análisis de compostaje ...	35
4.1.2	Análisis químico inicial del residuo sólido sintético y del compost final de los reactores .....	39
4.2	<i>Verificación de la validez del ensayo realizado según la norma INTE/ISO 20200:2020</i> .....	41
4.2.1	Grado de desintegración de los polímeros .....	41
4.2.2	Disminución del contenido de los sólidos volátiles .....	43
4.3	<i>Estudio de factibilidad para la implementación de la Norma INTE/ISO 20200:2020</i> .....	45
4.3.1	Estudio preliminar de mercado .....	45
4.3.2	Estudio técnico-operativo .....	47

4.3.3	Estudio ambiental.....	51
4.3.4	Estudio económico.....	54
<b>5</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>Apéndices.....</b>	<b>87</b>
	Apéndice 1: Datos de cada reactor durante el control operativo del procedimiento de compostaje en el período de control termofílico.....	88
	Apéndice 2: Entrevista dirigida al coordinador del CEQIATEC.....	90
	Apéndice 3: Entrevista dirigida a directora de normalización de INTECO.....	92
	Apéndice 4: Bitácora de tiempo de las actividades realizadas durante el método de ensayo de la norma INTE/ISO 20200:2020.....	93
	Apéndice 5: Energía consumida estimada durante cada proceso del método de ensayo de la norma INTE/ISO 20200:2020.....	95
	Apéndice 6: Inventario de Gases de Efecto Invernadero de las actividades de la norma INTE/ISO 20200:2020.....	96
<b>9</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>97</b>
	Anexo 1: Informe de ensayo de la norma INTE/ISO 20200:2020.....	99

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1. (a), (b) y (c) Estructuras químicas simplificadas de los polímeros PLA, PS y PET, respectivamente [20], [21], [22].....	9
Fig. 2.2. Variación de la temperatura (°C) y pH versus tiempo durante las cuatro fases de compostaje [15].....	12
Fig. 3.1. Presentación de los polímeros utilizados en la investigación. (a) Envase de PLA. (b) Bolsas de basura oxobiodegradables.....	25
Fig. 3.2. (a) y (b) Recipientes utilizados para la elaboración de 6000g de RSS y para los reactores de compostaje requeridos en el procedimiento de compostaje de polímeros .....	27
Fig. 3.3. Polímeros en fragmentos de 2,5 x 2,5 cm utilizados en el análisis del proceso de compostaje. (a) Polímero PLA. (b) Polímero oxobiodegradable .....	28
Fig. 4.1. Aspecto visual de los reactores de compostaje con presencia de hongo. (a) Reactor con polímero PLA. (b) Reactor con polímero oxobiodegradable .....	40
Fig. 4.2. Aspecto visual de los polímeros recuperados al finalizar el proceso de compostaje. (a) Polímero PLA. (b) Polímero oxobiodegradable .....	43
Fig. 4.3. Diagrama de los principales procedimientos del método de ensayo de la norma INTE/ISO 20200:2020.....	48
Fig. 4.4. Distribución porcentual de la energía consumida estimada por proceso.....	53

## LISTA DE TABLAS

TABLA I. Definiciones y clasificaciones de plásticos no convencionales .....	8
TABLA II. Características de los polímeros analizados en el método de ensayo .....	26
TABLA III. Composición del residuo sólido sintético inicial para elaborar 6000g .....	27
TABLA IV. Procedimiento de compostaje para el período de incubación termofílico .....	29
TABLA V. Aspecto visual y olor de los reactores durante las ocho semanas del proceso de compostaje .....	37
TABLA VI. Análisis químicos del residuo sólido sintético inicial y del compost final de los reactores de compostaje .....	41
TABLA VII. Grado de desintegración de los polímeros de cada reactor de compostaje .....	44
TABLA VIII. Disminución de los sólidos volátiles totales .....	45
TABLA IX. Aspectos técnicos y operativos de cada etapa del procedimiento del método de ensayo .....	49
TABLA X. Comparación de la energía estimada por proceso entre el tiempo mínimo y tiempo máximo del período de incubación termofílico .....	54
TABLA XI. Costos iniciales del proyecto asociado a la implementación del escenario 1... 56	
TABLA XII Costos asociados a la operación del método de ensayo para un servicio del escenario 1.1 .....	57
TABLA XIII. Flujos de efectivo del proyecto para el escenario 1.1 .....	58
TABLA XIV. Flujos de efectivo del proyecto para el escenario 1.2.....	60
TABLA XV. Costos iniciales del proyecto asociado a la implementación del escenario 2... 62	
TABLA XVI. Flujos de efectivo del proyecto para el escenario 2.....	64
TABLA XVII. Costos iniciales del proyecto asociado a la implementación del escenario 3 .....	66
TABLA XVIII. Costos asociados a la operación del método de ensayo para un servicio del escenario 3 .....	67
TABLA XIX. Flujos de efectivo del proyecto para el escenario 3.....	69
TABLA XX. Índices de bondad financiera de todos los escenarios anteriores .....	70
TABLA XXI. Comparación de los aspectos relevantes de los escenarios 1, 2 y 3 .....	71

## **LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS**

CEQIATEC	Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos
CIPA	Centro de Investigación en Protección Ambiental
ECA	Ente Costarricense de Acreditación
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FC	Factor de emisión
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INTECO	Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
ME	Material de ensayo
MS	Masa seca
PCG	Potencial de Calentamiento Global
PET	Tereftalato de polietileno
PLA	Ácido poliláctico
POX	Plástico oxobiodegradable
PE	Polietileno
R1	Reactor 1
R2	Reactor 2
R3	Reactor 3
R4	Reactor 4
R5	Reactor 5
R6	Reactor 6
RSS	Residuo sólido sintético
SV	Sólidos volátiles
TIR	Tasa interna de retorno
TMAR	Tasa mínima atractiva de retorno

## RESUMEN

La problemática ambiental a causa del incremento de materiales poliméricos, conocidos como “plásticos”, y su inadecuada gestión, continúa alrededor del mundo. La persistencia de estos materiales en el ambiente conduce a consecuencias negativas para todos los ecosistemas, incluyendo las matrices ambientales: agua, suelo y aire. Actualmente, han surgido alternativas a este tipo de polímeros, como lo son los plásticos “compostables”, diseñados para degradarse bajo condiciones específicas de compostaje. No obstante, para garantizar su eficacia y evitar el uso indebido del término “compostable”, es indispensable contar con criterios técnicos respaldados por normas estandarizadas. Al año 2025 en Costa Rica, no existen laboratorios acreditados que brinden el servicio de pruebas normalizadas que permitan comprobar la veracidad de estos productos alternativos. Por lo tanto, en esta investigación se propone analizar la factibilidad para la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020: Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio* en el CEQIATEC. Primeramente, se aplicó el método de ensayo descrito en la norma analizando muestras de plástico de empaque de alimento de “ácido poliláctico” (PLA) y bolsas comerciales “oxobiodegradables” (POX). Se realizó un análisis de la información recolectada en el proceso para lograr llevar a cabo un estudio de factibilidad de mercado, técnico, operativo, ambiental y económico. En conclusión, al finalizar los 45 días del proceso de compostaje, el grado de desintegración para el PLA fue de 97,32% y para el POX fue de 0%. Según la norma en cuestión, para que los resultados del ensayo sean válidos, deben cumplir dos criterios: una disminución del contenido en sólidos volátiles igual o superior al 30% y una variabilidad igual o menor al 20% en el resultado de los grados de desintegración en las tres réplicas de cada material plástico analizado. En este caso, sólo se cumplió uno de estos criterios (variabilidad  $\leq 20\%$ ), por lo tanto, el ensayo aplicado para los materiales poliméricos tratados se consideró inválido, según los requisitos normativos para la evaluación de la desintegración de dichos plásticos. Con respecto al estudio de factibilidad, los aspectos más relevantes son los siguientes: dentro del mercado hay baja oferta y más demanda; en el área técnica-operativa el proceso con mayor duración fue el procedimiento de compostaje en el período de incubación termofílico; en el estudio ambiental, el consumo energético presenta el impacto ambiental más significativo y, por último, en la evaluación financiera todos los escenarios

expuestos son económicamente viables, bajo las condiciones establecidas; sin embargo, se recomienda el escenario 1, ya que ofrece el costo de servicio más bajo, en comparación con el resto de los escenarios analizados.

**Palabras clave:** Polímeros, compostable, biodegradable, oxobiodegradable, factibilidad

## ABSTRACT

The environmental issues caused by the rise of polymeric materials also known as “plastic” and their inadequate management is spread all throughout the world. The persistence of this material in the environment leads to negative consequences for all ecosystems, including water, soil and air. Currently, there are alternatives to these types of polymers that are known as “compostable”, designed to degrade under specific conditions of a composting process. However, to ensure the efficiency of these alternatives and adequately use the term “compostable”, there must be an adherence to technical criteria and standardized guidelines. As of 2025, there are no accredited laboratories in Costa Rica that offer standardized tests to verify the legitimacy of these alternative “compostable” products. This research aims to analyze the implementation feasibility for the standard *INTE/ISO 20200:2020: Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio* in the CEQUIATEC laboratory. First, the testing method described in the standard *INTE/ISO 20200:2020* was implemented by analyzing plastic food packaging samples made of “polylactic acid” (PLA) and bags made of “oxobiodegradables” (POX). Further analysis from this data was conducted to determine the market feasibility on a technical, operative, environmental and economic basis. In conclusion, after 45 days of the composting process the disintegration rate of PLA was 97.32% and 0% for POX. According to the referenced standard (*INTE/ISO 20200:2020*), the results must meet two criteria for their validation: a decrease in volatile solids (SV) greater than or equal to 30% and a variability less than or equal to 20% for the three samples of each material. In this case, only one of these criteria was met (variability  $\leq 20\%$ ), for this reason, the test method for the treated polymeric materials was deemed invalid, based on the regulatory requirements for evaluating the disintegration of plastics. Regarding the feasibility study, the most relevant aspects are the following: the market currently has low supply and high demand; in the technical-operational area, the composting process during the thermophilic incubation period had the longest duration; in the environment study the energy consumption presented the most significant environmental and, lastly about financial evaluation all the exposed scenarios are economically viable under the established conditions; however, the scenario 1 is recommended, as it has the lowest cost of service compared to the other analyzed scenarios.

**Keywords:** Polymer, compostable, biodegradable, oxobiodegradable, feasibility

## 1 INTRODUCCIÓN

Los materiales poliméricos, conocidos como “plásticos”, han facilitado la vida humana desde su invención. Dada su gran resistencia, durabilidad en el tiempo y factibilidad en diversas aplicaciones, su consumo ha aumentado. La gran mayoría de los polímeros son fabricados a partir del procesamiento de combustibles fósiles, como el petróleo o gas natural, los cuales son considerados como recursos naturales no renovables [1]. La persistencia de estos materiales en el medio ambiente y su inadecuado tratamiento provoca una fuente significativa de daño a los ecosistemas y a los seres vivos. En Costa Rica, se producen alrededor de 3900 toneladas diarias de residuos sólidos, donde el 53% corresponde a residuos orgánicos, el 33% a materiales valorizables y el 24% restante a “otros”; 600 toneladas diarias pertenecen a residuos plásticos [2]. De todos los residuos recuperados anualmente por parte de las municipalidades y gestores autorizados, se estima que un 6,6 % son reciclados [2].

En vista de la problemática ambiental, ha surgido la comercialización de “bioplásticos”, como lo son los “plásticos compostables”. Estos están hechos de materiales que tienen como principal característica la biodegradación en condiciones específicas de compostaje [4]. Lo anterior permite una permanencia más reducida en los ecosistemas, una disposición adecuada de los materiales biodegradables y, por ende, una disminución en el impacto ambiental. Además, la cantidad de residuos orgánicos lidera el porcentaje total de residuos recolectados, de tal forma que el compostaje representa una valiosa alternativa agroambiental que puede ser parte de la solución al problema de contaminación provocado por una incorrecta gestión y disposición final de residuos valorizables [5].

En los últimos años, Costa Rica se ha comprometido con dicha situación tanto a nivel nacional como internacional. En 2016, adquirió compromiso con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [5], donde ha promovido estrategias nacionales para lograr las metas descritas en estos. A nivel país, impulsó el Plan Nacional de Compostaje 2020-2050 [6], el Plan Nacional de Residuos Marinos 2021-2050 [3] y también, la vigencia de la “*Ley de Gestión Integral de Residuos*” (N°8839) [7] y la “*Ley para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente*” (N° 9786) [8]. No obstante, [3] mencionan que la puesta en marcha de algunos aspectos de la legislación en cuestión se ha visto afectada por la falta de infraestructura y laboratorios acreditados capaces de realizar procesos de normalización y

certificación que respalden la característica de “compostables”, entre otros términos, a los polímeros alternativos; esto es esencial para evitar etiquetado engañoso, aumentar la confianza del consumidor y cumplir de manera real con la protección ambiental.

Con el fin de realizar un aporte al país en relación con lo descrito, se justifica llevar a cabo un estudio de factibilidad para implementar la norma *INTE/ISO 20200:2020: Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio*. De esta forma, se podría abrir oportunidad para el avance en laboratorios de Costa Rica, comenzando por el Centro de Investigación y Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) y así, contar con evidencias obtenidas mediante metodologías normalizadas, que sustenten técnicamente la degradación de materiales plásticos llamados “compostables”.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general**

Analizar la factibilidad para la implementación de la norma INTE/ISO 20200:2020: “Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio“, en el Centro de Investigación y Servicios Químicos y Microbiológicos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

1. Caracterizar el residuo sólido sintético (“inóculo más mezcla de componentes”) y el material de ensayo (“plástico”) para la aplicación del método de la norma INTE/ISO 20200:2020.
2. Aplicar el método de ensayo y su validación descritos en la norma INTE/ISO 20200:2020 para el análisis de los materiales poliméricos PLA y POX.
3. Determinar las condiciones y requerimientos técnicos necesarios en el CEQIATEC para la implementación de la norma INTE/ISO 20200:2020.

## **2 REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL PLÁSTICO**

En la actualidad, los materiales poliméricos (“plásticos”) se emplean en diversas industrias para satisfacer numerosas necesidades de los seres humanos. Sus características químicas, mecánicas, ópticas y térmicas los hacen atractivos e ideales para múltiples aplicaciones. Además, tales características se pueden modificar y obtener productos más específicos, lo que aumenta su uso y producción alrededor del mundo [9]. La mayoría de los plásticos que disponen de propiedades deseables como resistencia, rigidez, densidad, resistencia al calor, conductividad eléctrica, pertenecen al grupo llamado polímeros sintéticos. Estos se sintetizan de manera artificial a partir de macromoléculas conformadas por la unión de monómeros provenientes, en su mayoría, de hidrocarburos fósiles [10]. Lo anterior significa que la descomposición de este material dura cientos de años, lo que ha llevado al planeta a una crisis por contaminación de plásticos. Además, la extracción conlleva múltiples impactos negativos en el ambiente, por ejemplo, se produce una cantidad numerosa de desechos que contienen metales pesados, teniendo la capacidad de afectar el desarrollo de los seres vivos [11].

Alrededor de 8 millones de toneladas de plástico contaminan las principales cuencas oceánicas cada año, según datos del 2021 [3], y menos del 15% del plástico producido alrededor del mundo es reciclado; gran parte del resto termina acumulándose en ecosistemas naturales [12]. Lo anterior demuestra una inadecuada disposición de residuos plásticos, lo que se traduce en una acumulación de estos en las distintas matrices ambientales, como agua, aire y suelo. De esta forma, logra introducirse en la cadena alimenticia de los seres humanos, lo que significa un riesgo directo a la salud. Además, la producción de plásticos propiamente también tiene un impacto ambiental importante; los procesos de fabricación o modificación de sus propiedades pueden generar emisiones tóxicas y productos químicos peligrosos [1].

### **2.2 PLÁSTICOS NO CONVENCIONALES**

Los plásticos no convencionales son una categoría emergente de materiales poliméricos que se diferencian de los plásticos tradicionales por su composición, propiedades y, en muchos casos, su menor impacto ambiental gracias a su biodegradabilidad [13]. Han

surgido algunas alternativas para reemplazar los polímeros sintéticos, que si bien es cierto no es la solución definitiva, podrían significar una reducción en los efectos negativos que está sufriendo el medio ambiente y los seres vivos. La Tabla I presenta conceptos acerca de los distintos tipos de plásticos que forman parte de otras alternativas.

**TABLA I**  
**DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN DE PLÁSTICOS**  
**NO CONVENCIONALES**

<b>Clasificación</b>	<b>Definición</b>	<b>Fuente/origen</b>
Biobasados	Se consideran de este tipo si son de base biológica.	Materias primas de origen renovable, o biológico, como los materiales de origen vegetal.
Biodegradables	Son aquellos que se descomponen por la acción de microorganismos en elementos básicos como agua, biomasa y gas.	Materias primas renovables o sintético.
Bioplásticos	Se clasifican según su degradabilidad: biobasados biodegradables, biobasados no biodegradables y de origen sintético biodegradables.	Materias primas renovables o sintético.
Compostables	Durante el proceso de compostaje, son capaces de degradarse por procesos biológicos para producir CO <sub>2</sub> , agua, compuestos inorgánicos y biomasa, en conjunto con otros materiales compostables, sin dejar residuos distinguibles.	Materias primas renovables o sintético.
Oxodegradables	Son aquellos a los que se les añaden productos químicos para acelerar la oxidación y fragmentación bajo el calor y el oxígeno. Son capaces de descomponerse en productos químicos orgánicos bajo ciertas condiciones específicas.	Sintético.

Nota: Se presentan las definiciones y clasificación de plásticos no convencionales. [14], [15]

La biodegradabilidad está dada por la estructura química y por las condiciones ambientales al que se exponga el material y no por el origen de este. Por lo que no todos los plásticos biobasados pueden considerarse biodegradables o compostables [16]. Por otra parte, no todos los materiales biodegradables son compostables, pues estos últimos presentan la

característica de compostabilidad, la cual se refiere a la aptitud de un material para biodegradarse en un proceso de compostaje [17] y al final convertirse en compost.

Si bien, en el mercado actual existen múltiples tipos de estos materiales, en esta investigación se profundiza específicamente en dos que fueron seleccionados para su análisis: el ácido poliláctico (PLA), un bioplástico compostable a partir de fuentes renovables [18], y los plásticos oxobiodegradables, que incorporan aditivos para facilitar su degradación en condiciones específicas.

### 2.2.1 Ácido poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (PLA) se considera un bioplástico con la característica de ser termoplástico, por lo que tiene la capacidad de ablandarse con el aumento de temperatura y solidificarse al disminuirla [18]; su molécula precursora es el ácido láctico y se obtiene mediante la fermentación de fuentes renovables. Por lo general, se deriva del almidón de maíz, caña de azúcar, almidones de arroz, trigo y papa. Este monómero se polimeriza para la producción de PLA. Dicho bioplástico presenta una rigidez similar al polietileno (PE), o al tereftalato de polietileno (PET) [19], cuyas estructuras químicas simplificadas se pueden observar en la Figura 2.1.

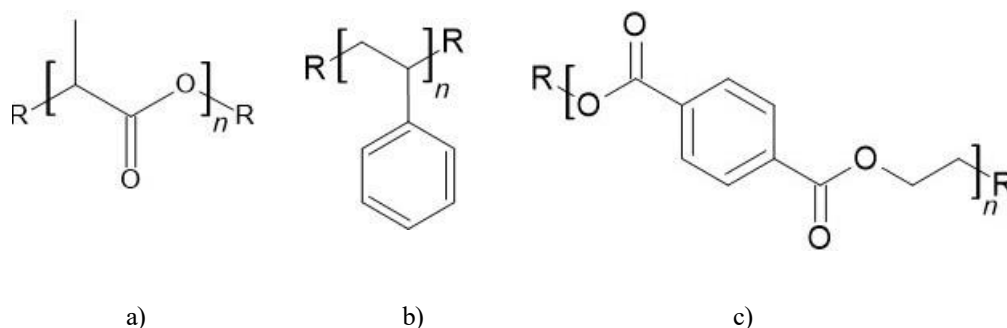


Fig. 2.1. (a), (b) y (c) Estructuras químicas simplificadas de los polímeros PLA, PS y PET, respectivamente. [20], [21], [22]

Actualmente, el PLA se ha convertido en una buena opción en la sustitución de ciertos plásticos convencionales, por sus características de origen renovable, su biodegradabilidad y compostabilidad, procesabilidad y aplicaciones en diversas industrias. Por ejemplo, en la

alimentaria, se ha utilizado como material de empaque al cumplir funciones como protección mecánica, barrera a la humedad, a la luz, a las grasas y a los gases, así como en la elaboración de recipientes de papel recubiertos de PLA para el envasado de bebidas [23]. El PLA es un material biodegradable donde los microorganismos colonizan la superficie del polímero y son capaces de segregar enzimas que lo rompen en pequeños fragmentos.

Su proceso de biodegradación dependerá de factores como el oxígeno, humedad, nutrientes, minerales, temperatura y pH [23]. Además, puede ser naturalmente compostado en humus, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O), ocurriendo una degradación completa en un corto plazo bajo condiciones específicas de compostaje [24]. Este proceso se discutirá más adelante, aun así, el compostaje se refiere a la transformación aerobia de la materia orgánica por parte de diferentes tipos de agentes microbianos en ciertas condiciones [25].

Segura [26] analizó la degradación del PLA en reactores tipo rotatorios y reactores tipo caja, en compostaje casero y sus resultados muestran que la desintegración en reactores tipo rotatorios fue superior a un 95% y las fases mesófilas y termófilas favorecieron la biodegradación y la desintegración del PLA; mientras que en reactores tipo cajas tuvo un comportamiento diferente y no se desintegró significativamente. Lo que concluye que el compost obtenido de las composteras rotatorias y las altas temperaturas superiores a 50 °C benefician la desintegración del polímero bajo estudio.

Por otra parte, un estudio llevado a cabo en Costa Rica en el 2022 [27], evaluó la biodegradabilidad de materiales plásticos, entre estos, el PLA. Después de 18 meses (78 semanas) en condiciones de 25 ± 5 °C en compostaje casero, los plásticos permanecieron inalterados. Las muestras analizadas correspondían a vasos desechables con las características de “biodegradable” y “compostable”, obtenidos de un supermercado del país. No obstante, el estudio rescata la posibilidad de una positiva degradación en condiciones distintas de compostaje (industriales o de laboratorio).

### **2.2.2 Plásticos oxobiodegradables**

Este tipo de material tiene como estrategia el uso de aditivos pro-oxidantes que actúan como iniciadores de una foto-oxidación para promover la fragmentación del polímero y así facilitar el ataque microbiano posterior. El aditivo añadido durante el proceso de fabricación

en determinadas concentraciones es activado por algún factor abiótico, especialmente luz y/o calor para reaccionar con el oxígeno ambiental [28] y provoca en el material polimérico una disminución en el peso molecular, carácter hidrófobo, y carácter de las cadenas de polímero; al final se forman compuestos más livianos y asimilables para el metabolismo de microbios, bacterias, algas y hongos [29]. Los más comunes en el mercado actual son bolsas de basura, guantes y envases.

Sin embargo, en la actualidad se le atribuye la característica de bioplásticos e incluso compostables, a los polímeros denominados “oxo” [30]. Ante la preocupación de la desinformación y las consecuencias al medio ambiente, se analizó plásticos “oxo” en condiciones de compostaje casero. El comportamiento del material fue muy similar al polietileno, donde en el ambiente o en una compostera es inmune y no presenta cambios visibles. Se concluye que los plásticos “oxo” no deberían de considerarse como un material inofensivo para el ambiente [31] y que es importante promover la correcta información a los consumidores porque muchas veces se prefiere este tipo de polímeros al creer que se degradan fácilmente en ambientes naturales, cuando en realidad, su posible degradación es en condiciones industriales que no se tienen en el país, según Arroyo [31].

Adicionalmente, en el mismo estudio mencionado en la sección 2.2.1 [27], se analizó polímeros oxobiodegradables bajo las condiciones de compostaje casero a  $25 \pm 5$  °C, donde no se obtuvo degradación de este material polimérico. La compostabilidad o biodegradabilidad están relacionadas con las condiciones en las que se aplican los procesos de compostaje y de las propiedades reales de los polímeros. La investigación resalta la importancia de revisar las etiquetas de los productos comercializados bajo la característica de “compostable”, “biodegradable”, “oxobiodegradable” o “biobasado”, y especificar las condiciones de compostaje que se deben aplicar, para no generar confusión a los consumidores.

### **2.3 COMPOSTAJE**

El proceso de compostaje permite la biodegradación aeróbica controlada de la materia orgánica antes de ser incorporada al suelo y su producto final es el compost o abono orgánico [32]. El compost es el producto obtenido de la biodegradación de una mezcla formada

mayoritariamente por residuos vegetales y otros materiales orgánicos [15]. A pesar de que cada proceso de compostaje es distinto, consta de cuatro fases, mostrado en la Figura 2.2.

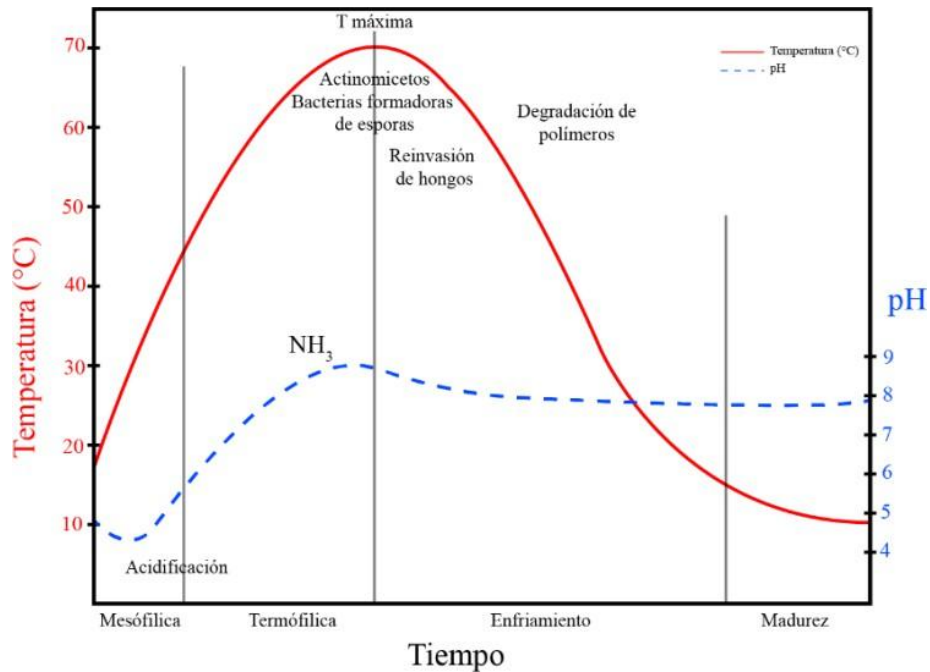


Fig.2.2. Variación de la temperatura (°C) y pH versus tiempo durante las cuatro fases de compostaje. [15]

La primera fase es la mesofílica, al inicio del proceso la temperatura se encuentra en valores ambientales. Debido a la actividad microbiana, la temperatura aumenta considerablemente hasta alcanzar en pocos días los 40 °C [25]. Los microorganismos utilizan fuentes de carbono (C) y nitrógeno (N) generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos, por lo que el pH puede disminuir. Esta etapa tiene una duración de pocos días, entre dos y ocho [33].

En la fase termofílica se pueden alcanzar temperaturas de (70-80) °C. La mayor parte de la celulosa es degradada. A partir de los 60 °C, los hongos termófilos detienen su actividad y las reacciones de oxidación se llevan a cabo por bacterias formadoras de esporas y por actinomicetos [25]. Los microorganismos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco, provocando que el pH del medio aumente. El período de esta fase puede durar días o incluso meses, dependiendo de las condiciones climáticas, del material de partida y otros factores [33].

La tercera fase es la mesófila II o de enfriamiento. A causa de un agotamiento de las fuentes de carbono y nitrógeno, las temperaturas disminuyen. Por debajo de los 40 °C, los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente. La duración de esta etapa puede tardar algunas semanas. Finalmente, se llega a la fase de maduración. Se alcanza la temperatura ambiente y se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados [33].

### 2.3.1 Variables del proceso de compostaje

Durante el compostaje, al ser una transformación liderada por microorganismos, es indispensable tomar en cuenta las variables que afectarán el desarrollo y crecimiento de estos. Además, las condiciones ambientales, los materiales a utilizar y el método de empleo influyen en el proceso de compostaje y podrían variar los parámetros, por lo que se deben mantener bajo observación. Es importante resaltar que todos están relacionados entre sí y la variación de uno de estos afectará a los demás. Las variables por tomar en cuenta, según el “Manual de Compostaje del Agricultor” realizado por la FAO [33] se mencionan a continuación:

**Oxígeno:** Los microorganismos necesitan una adecuada oxigenación que les permita realizar su trabajo y que, a su vez, se libere dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Es necesario un balance adecuado de aireación, pues un exceso generaría que la temperatura y la humedad disminuya, provocando una pausa en el proceso de descomposición. Las células de los microorganismos se deshidratan, algunos producen esporas y se detiene la actividad enzimática encargada de la degradación de los diferentes compuestos. Por otra parte, si hay una disminución considerable de oxígeno, se genera un exceso de humedad y se produce anaerobiosis.

**Humedad:** Los microorganismos usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular, por lo que este parámetro es esencial. Si la humedad es baja (<45%), disminuye la actividad microbiana y no se completarán todas las fases de degradación, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (>60%) el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material.

**Temperatura:** Durante todo el proceso, las temperaturas varían dependiendo de la fase en que se encuentre. Se inicia a una temperatura ambiente, luego aumenta por la actividad microbiana y al final, llega a la etapa de maduración donde se encuentra nuevamente a temperatura ambiente. Es importante que estos cambios se den de forma progresiva, para evitar que descienda muy rápido, pues a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición.

**pH:** Esta variable depende de los materiales de origen a utilizar y varía en cada fase del proceso. Se relaciona directamente con la supervivencia de los microorganismos. Al inicio del proceso, el valor de pH es bajo, alrededor de 4,5 por la presencia de ácidos orgánicos. Seguidamente, por la conversión del amonio en amoniaco el pH aumenta, y por último, se estabiliza a un valor cercano a 7,0 (neutro). Si el pH es muy bajo (<4,5) indicaría que hay un exceso de ácidos orgánicos a causa de los materiales vegetales como restos de cocina y frutas, lo cual tiende a acidificar el medio. Por el contrario, un pH alto (>8,5) significa un exceso de nitrógeno en el material de origen, con una deficiente relación C/N, asociado a humedad y altas temperaturas, por lo que se produce amoniaco alcalinizando el medio.

**Relación Carbono-Nitrógeno (C/N):** Esta relación varía en función del material de origen y se obtiene la relación numérica al dividir el contenido de C (%C total) sobre el contenido de N total (%N total) de los materiales a compostar. En caso de haber un exceso de carbono (C/N>35), el proceso tiende a enfriarse y avanzar más lento. Si hay un exceso de nitrógeno (C/N<15), el proceso tiende a calentarse en exceso y se generan malos olores por el amoniaco liberado.

**Tamaño de la partícula:** La actividad microbiana se relaciona con la facilidad de acceso al sustrato, por lo que el tamaño de la partícula es de gran importancia. Si las partículas son pequeñas, hay una mayor superficie específica, lo cual facilita el acceso al sustrato. Se considera un tamaño ideal de los materiales de (5-20) cm. En caso de que las partículas sean de gran tamaño (>30cm), estas podrían ocasionar un exceso de aireación, disminuyendo la temperatura y desacelerando el proceso. Por el contrario, si las partículas son menores a 5 cm se corre el riesgo de compactación, ya que crean poros pequeños que se llenan de agua y de esta forma, limitan el acceso de aire conduciendo a un ambiente anaerobio.

### *2.3.1.1 Crecimiento excesivo de hongos*

Los microorganismos que más participan en el proceso de compostaje son los hongos, por su capacidad para degradar residuos de plantas y animales como celulosa, quitina y pectina, y en algunos por su cualidad de tolerar las temperaturas del proceso (termotolerantes) [34]. Sin embargo, es importante cumplir con las variables de compostaje para que los hongos cumplan la función ideal y no terminen colonizando el compostaje. Lo anterior se puede dar por una acumulación de humedad por falta de oxigenación, ya que así sería un ambiente óptimo para su crecimiento y reproducción [35]. Además, si el proceso no cumple correctamente con las distintas etapas y sus debidas temperaturas, ciertos microorganismos podrían tomar control del compost. A pesar de que los hongos desempeñan un papel fundamental en el proceso de compostaje [35], su proliferación excesiva puede alterar las condiciones necesarias para obtener un compost de calidad.

### *2.3.1.2 Minimización de olores derivados del compostaje*

El olor emanado de los procesos de compostaje es parte de cada una de sus etapas, estos pueden ser olores ácidos, amoniacales y “olor a tierra” (geosmina) [17]. Con un buen manejo y control del proceso, no debería haber presencia de mal olor o producción de gases contaminantes. Sin embargo, dependiendo de la ubicación donde se coloquen los equipos utilizados para llevar a cabo el procedimiento, estos olores naturales podrían generar molestia en el personal presente.

Para minimizar el efecto ocasionado por la propagación de olores en el sitio, se recomiendan los filtros de carbón activado, tomando en cuenta que sea dentro de equipos como hornos y en espacios cerrados como un laboratorio. Es un método de bajo presupuesto y fácil de implementar, absorben compuestos volátiles responsables de los olores [36] y no requiere cambios en infraestructura, pues se pueden colocar en la abertura de salida de aire de los hornos, antes de que estos sean liberados al ambiente. A pesar de que requieren reemplazos periódicos, son materiales económicos. En caso de que los olores sean de mayor intensidad, sería necesario implementar sistemas de extracción de gases con sistemas de ventilación más complejos.

El carbón activado es un material de carbón que se prepara para que tenga una elevada superficie y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de distintos compuestos. La actividad del carbón activo en los procesos de adsorción está dada por la naturaleza de la materia prima y el proceso de activación utilizado en la producción de este. Su capacidad absorbente se ve muy favorecida por la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares [36].

En la industria de gases, los filtros de carbón activado son utilizados en diversas aplicaciones, por ejemplo: eliminación de impurezas que causan olor, tratamiento de emisiones atmosféricas, purificación de aire y gases. Así como en otras industrias para el tratamiento de aguas residuales, eliminación de olor y sabor en agua potable, decoloración de vinos, entre otros [36].

## **2.4 PLÁSTICOS NO CONVENCIONALES EN COSTA RICA**

En Costa Rica, la situación con este tipo de polímeros refleja un creciente interés en alternativas más sostenibles debido a la creciente conciencia ambiental y las políticas públicas que buscan reducir el impacto de los residuos plásticos. Según PROCOMER, en el año 2019 [37], alrededor del 77% de las empresas del sector manufacturero de plásticos desechables, utilizan plásticos que presentan menor impacto ambiental, como los reciclados, biodegradables y/o compostables. El 55% de estas empresas, indicaron estar en condiciones de reemplazar la totalidad de su producción por dichas alternativas. El porcentaje restante indica lo contrario por las limitaciones que presenta el tema, la más significativa es la financiera; la baja capacidad de los clientes de pagar el sobreprecio de bioplásticos y además, las restricciones de funcionalidad.

Sin embargo, la mayoría de los plásticos utilizados en Costa Rica no provienen de fuentes renovables, por lo que aún hay que redireccionar a la industria del plástico a una producción con materias primas renovables y alternativas que faciliten su valoración ambiental, como los polímeros biodegradables y compostables [5]. No obstante, lo anterior debe estar vinculado con una correcta gestión de los residuos plásticos para evitar un impacto negativo en el medio ambiente.

En cuanto al marco legal, en el año 2017 el gobierno de Costa Rica lanzó la Estrategia Nacional para la sustitución de plásticos de un solo uso por alternativas renovables y

compostables [38]. Se impulsó el Plan Nacional de Compostaje 2020-2050 [6] y el Plan Nacional de Residuos Marinos 2021-2050 [3], entre otros. Lo anterior conduce a una economía circular, donde su objetivo es establecer un proceso productivo que sustituya el concepto de residuos por subproductos, es decir, que aquellas materias que antes se consideraban remanentes se conviertan en subproductos a los cuales se les asigne un uso y funcionalidad [6].

Entre las leyes vigentes con respecto al tema en cuestión, se encuentra la “*Ley de Gestión Integral de Residuos*” (N°8839) [7] y la “*Ley para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente*” (N° 9786) [39]. Con respecto a esta última, en el borrador del Reglamento Técnico del Ministerio de Salud, menciona los parámetros que deben cumplir las bolsas plásticas para ser consideradas de bajo impacto ambiental; hace referencia a algunas normas técnicas con relación a degradación de materiales plásticos [40], sin embargo, este reglamento se encuentra en proceso de elaboración y consulta. La efectividad de este sistema ha encontrado limitaciones relacionadas a la ausencia de infraestructura y laboratorios equipados para la implementación de procesos de certificación [41].

El Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) es el representante ante las organizaciones internacionales y regionales de normalización de la Organización Internacional de Normalización (ISO) [17]. De esta manera, las diferentes organizaciones del país pueden optar por normas técnicas que les brinden un conjunto de herramientas con el potencial de ayudarles a tener un mejor desempeño, ser más competitivas, promover el desarrollo sostenible y darle confiabilidad a sus productos y servicios.

En el año 2019, INTECO presentó una norma técnica nacional llamada *INTE B25:2019. Etiquetado RCM para materiales renovables y compostables. Productos con contenido de materiales plásticos*. Así, se podrán diferenciar los productos hechos de materiales plásticos provenientes de fuentes renovables, si estos son compostables en tierra o bajo condiciones de ambiente marino; con un etiquetado válido para la veracidad de la información brindada. INTECO desarrolló también un grupo de normas adicionales que establecen los métodos de ensayo que respaldan el cumplimiento de la INTE B25:2019 [42]. Sin embargo, en Costa Rica no existen laboratorios acreditados que puedan realizar las pruebas, así como otras de composición de plásticos, plásticos biodegradables y biodegradabilidad [3].

A nivel internacional, Costa Rica se comprometió con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas asumiendo el reto de garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, así como una disminución sustancial de la generación de residuos mediante políticas de prevención, reducción, reciclaje y reutilización [43]. Además, se convirtió en el primer país del mundo en suscribir un Pacto Nacional por los ODS [5]. Dentro de estos resaltan los siguientes objetivos: objetivo 12 “Producción y consumo responsables”, objetivo 13 “Acción por el clima”, objetivo 14 “Vida submarina” y objetivo 15 “Vida de ecosistemas terrestres” [36]. En el 2021, Costa Rica pasó a ser miembro oficial de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). En consecuencia, debe presentar informes que hagan constar la implementación de instrumentos jurídicos de la organización en materia de ambiente y de residuos, para los cuales elaboró planes de acción durante el proceso de adhesión a la OCDE [44].

## **2.5 NORMA INTE/ISO 20200:2020**

En la misma línea de continuar con el proceso de sustituir plásticos desechables derivados de combustibles fósiles y la adquisición de normas y certificaciones válidas que le permitan a Costa Rica posicionamiento positivo tanto nacional como internacional, en materia de sostenibilidad, se hace relevante la norma *INTE/ISO 20200:2020: Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio*. Está dirigida para aplicarse en plásticos con la característica de ser compostables, sin embargo, no hay ninguna restricción que impida la aplicación de esta en cualquier tipo de plásticos [17].

Esta norma nacional es idéntica a la norma internacional *ISO 20200:2015 “Plastics. Determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions in a laboratory- scale test”*. Alrededor del mundo, hay distintos países que poseen laboratorios con dicha norma acreditada, como “Aropha Laboratory” en Estados Unidos [45], Laboratorios de AIMPLAS en España [46], “Intertek India Private Limited” [47], “Intertek Reino Unido” [48], entre otros. La versión actualizada y vigente es la *ISO 20200:2023*, internacionalmente [49].

La norma *INTE/ISO 20200:2020* consta de un método de ensayo para determinar el grado de desintegración de materiales plásticos al exponerlos en un ambiente de compostaje controlado en laboratorio. La desintegración, en este caso, puede definirse como un proceso físico que implica la fragmentación del material plástico en el compost final (ausencia de contaminación visual) [46], y se lleva a cabo en un proceso de compostaje donde la matriz sólida utilizada está compuesta de un residuo sólido sintético inoculado con compost maduro, donde se incluye el material de ensayo, refiriéndose al polímero por analizar.

La norma en cuestión menciona dos períodos de incubación: termofílico y mesofílico. Este primero contempla un lapso mínimo de 45 días o máximo de 90 días; en caso de que el material polimérico no este suficientemente desintegrado, es posible prolongar el ensayo mediante el período mesofílico, con un máximo de 90 días. Al finalizar el ciclo de compostaje, se determina el grado de desintegración haciendo pasar la matriz final por tres tamices (malla de 10 mm, 5 mm y 2 mm) y de esa forma, recuperar los residuos de materiales plásticos no desintegrados.

Es importante mencionar que el método no está enfocado en comprobar la biodegradabilidad del material de ensayo analizado en condiciones de compostaje, pues se tendría que realizar más ensayos para su confirmación [17] y la aplicación de otras normas enfocadas propiamente en la biodegradación. Además, contempla la recuperación del plástico con un diámetro mayor a la medida de la malla del último tamiz (2 mm); serían necesarias otras pruebas para analizar los residuos plásticos no desintegrados que sí atravesaron la malla y formaron parte del compost final.

### **2.5.1 Laboratorios acreditados**

Hasta el 2025, según el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) [50], en Costa Rica no existe ningún laboratorio con la acreditación de la norma *INTE/ISO 20200:2020*. En relación con biodegradabilidad, solo hay dos laboratorios acreditados que ofrecen los servicios: el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional posee el método modificado de la norma *INTE/ISO 10707:2018* y el método modificado a partir de OECD 301D (1992) para la determinación de biodegradabilidad en productos químicos solubles en agua [51]. El otro laboratorio es el CEQIATEC, el cual cuenta con la norma *INTE/ISO*

10707:2018 / Electrodo selectivo de oxígeno para la determinación de biodegradabilidad en productos de limpieza y cosméticos [52].

#### 2.5.1.1 *Proceso de acreditación*

El ECA establece una serie de requisitos y pasos que deben cumplir las distintas organizaciones que deseen obtener la acreditación de las normas de interés [53] El primer paso es la solicitud de acreditación donde se completan distintos formularios, seguido por la admisibilidad técnica de la solicitud (análisis de esta) y si todo cumple con los requisitos, se propone el equipo evaluador que participará del proceso. El siguiente paso es una evaluación documental y una evaluación in situ, para verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma de acreditación que aplica. Después de esto, se realizan las actividades posteriores que implican la revisión y emisión del informe de evaluación final. Por último, la toma de decisiones sobre la acreditación del organismo postulante y si fue otorgada, se les aplica un seguimiento donde son supervisados al menos una vez al año durante el ciclo de acreditación que tiene una duración de 4 años.

## **2.6 CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE SERVICIOS QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS (CEQIATEC)**

EL CEQIATEC se encuentra ubicado en las instalaciones de la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) en Cartago, pertenece a la Escuela de Química, y cuenta con diferentes laboratorios y unidades de trabajo. Se especializa en investigación científica y tecnológica, brinda apoyo a la docencia, ofreciendo también servicios en los campos de la química y microbiología ambiental e industrial.

Entre los servicios especializados están los de análisis de materia prima y productos terminados y análisis de suelos y sedimentos. Desde el año 2000, cuenta con análisis acreditados bajo la norma *INTE/ISO/IEC 1725:2017* en microbiología, agua potable y agua residual. El centro cuenta con una amplia gama de servicios dirigidos al sector, respaldados por la calidad y prestigio del TEC, tanto en equipos como en personal especializado. Algunos de los laboratorios con los que cuenta son: Laboratorio Químico de Análisis de aguas, Laboratorio Químico de Análisis de Aguas Residuales, Laboratorio de Análisis Microbiológicos, Laboratorio Químico de Análisis de Residuos Plaguicidas.

## 2.7 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

En la presente investigación se realiza un estudio de factibilidad para analizar de manera estructurada las condiciones, recursos y capacidades actuales del CEQIATEC para llevar a cabo la metodología de la norma *INTE/ISO 20200:2020*.

Para determinar la factibilidad de un proyecto, es ideal desarrollar fases que permitan analizar y evaluar su viabilidad. Estas fases se fundamentan en estudio de mercado, técnico, operativo, económico [54] y, en algunos casos, estudios ambientales para considerar el impacto al medio ambiente. Dichas fases se detallan a continuación.

En el análisis de mercado se determina la oferta y demanda del producto o servicio en cuestión, conocer si existe mercado disponible en la actualidad y aspectos relevantes de este [54]. El estudio técnico y operativo contemplan factores como la localización y tamaño óptimo de las instalaciones, métodos de distribución, procesos de producción, equipos y materiales necesarios, capital humano, tiempo requerido y en general, lo necesario para llevar a cabo la ejecución del producto o servicio [54]. El análisis ambiental dependerá del tipo de proyecto a desarrollar, sin embargo, se toma en cuenta cuáles son las actividades que mayor impacto ambiental, cuáles son los componentes ambientales con más influencia y cuáles son los tipos de efectos a enfrentar [55].

Por último, el estudio económico se basa en las siguientes herramientas financieras (índices de bondad financiera), según Blank et al [56]:

Tasa Mínima Atractiva de Retorno (TMAR): La TMAR es la tasa mínima que el inversionista espera recibir para evaluar y elegir una opción que le sea rentable. Para que un proyecto sea económicamente viable, el rendimiento de la inversión debe ser mayor a la TMAR.

Valor Actual Neto (VAN): Es un indicador de rentabilidad el cual busca traer desde el futuro al “ahora” los flujos de efectivo con base en la tasa de descuento TMAR. Las distintas alternativas que se pueden obtener son:

- ✓  $VAN > 0$  la tasa de rendimiento es mayor que TMAR, por lo que generará ganancias
  - ✓  $VAN = 0$  la tasa de rendimiento es mayor que TMAR, por lo que generará beneficios
  - ✓  $VAN < 0$  la tasa de rendimiento es mayor que TMAR, por lo que generará pérdidas
- por lo tanto, la regla de decisión que determina si un proyecto es rentable es si el  $VAN \geq$  TMAR.

Periodo de recuperación (PR): El PR es un indicador de liquidez o de riesgo el cual calcula el

número de periodos para que los flujos de entrada sean iguales a los de salida, es decir, indica en cuántos periodos se recupera la inversión realizada en el proyecto.

Tasa Interna de Retorno (TIR): La TIR es la tasa de descuento que hace que la suma de los flujos netos traídos al valor presente sea igual a la inversión inicial. La regla de decisión es la siguiente:

- ✓  $TIR \geq TMAR$ : se acepta la inversión
- ✓  $TIR < TMAR$ : se rechaza la inversión

El criterio de decisión para que un proyecto sea viable económicamente es que la TIR sea mayor que la tasa de mínima atractiva de retorno [57].

### **2.7.1 Aspectos del análisis de factibilidad ambiental**

Si bien el análisis ambiental varía según el tipo de proyecto, en todos los casos se considera fundamental tomar en cuenta las actividades con mayor impacto ambiental. Para esta investigación, los componentes más significativos se pueden evaluar mediante dos herramientas: un balance de energía y un inventario de gases de efecto invernadero.

Un balance de energía es un estudio que tiene como finalidad conocer cuánto consume de electricidad cada proceso que se realiza. Para llevar a cabo este análisis, es necesario contemplar la cantidad de equipos utilizados, su potencial nominal, así como la cantidad de horas que permanecen en funcionamiento [58]. De esta manera, los resultados se toman en cuenta para temas tanto ambientales como económicos.

El Inventario de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es un reporte que permite a una organización identificar, medir y gestionar sus emisiones y remociones de GEI [59]. Para cuantificar las emisiones de GEI, primero es necesario identificar sus fuentes que generan emisiones (cualquier proceso que libera estos gases a la atmósfera). Para conocer las emisiones asociadas a las fuentes, es necesario obtener el dato de actividad y multiplicarlo por el factor de emisión.

El factor de emisión (FC) es un coeficiente que relaciona la actividad que genera GEI con la cantidad de emisiones producidas. Para convertir las emisiones diferentes de GEI en términos de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2e$ ) se utiliza el Potencial de Calentamiento Global (PCG), el cual es un índice que mide el impacto radiactivo de un GEI durante un período específico. Los FC y PCG son proporcionados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), estos deben ser

específicos y actualizados para cada actividad y tipo de GEI [60]. Al final, los resultados se expresan como tCO<sub>2</sub>e para poder unificar y comparar el impacto climático de distintos gases en una sola métrica común.

### **3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO SÓLIDO SINTÉTICO INICIAL Y DE LOS MATERIALES DE ENSAYO PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA NORMA INTE/ISO 20200:2020**

##### **3.1.1 Residuo sólido sintético**

La matriz sólida está conformada por un residuo sólido sintético (RSS) inoculado con compost maduro. La composición del RSS es 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; lo que conforma el 100% de masa seca. El aserrín es de madera no tratada y se obtuvo del Depósito de Maderas Sánchez, ubicado en Sabanilla, San José. El alimento para conejo es de la marca Rabbit Plus y su presentación es en esferas; el porcentaje de proteína cruda es de 16%, el cual cumple con la observación de la norma que indica un mínimo de 15%. El compost utilizado es de residuos orgánicos domésticos, con un tiempo de maduración de 3 meses. Para el almidón de maíz se utilizó maicena (fécula de maíz), para la sacarosa azúcar blanca regular y el aceite fue de soya. El fertilizante urea se obtuvo de Agro Ujarrás S.A.

##### **3.1.2 Parámetro de diagnóstico para el residuo sólido sintético inicial**

Se preparó una muestra de 500 g del RSS para corroborar que la relación carbono:nitrógeno (C/N) estuviera comprendida entre 20:1 y 40:1. Este análisis se realizó en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. El pH fue calculado con un pH-metro Accumet Basic Fisher Scientific en una muestra de 20 g de RSS mezclada con 100 g de agua destilada (relación de 1:5).

La determinación de masa seca (MS) y sólidos volátiles (SV) se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación de Ingeniería Ambiental en el Tecnológico de Costa Rica. Se utilizó un analizador de humedad marca OHAUS modelo MB90 para obtener la masa seca; se realizaron 4 repeticiones y se colocaron las muestras de 2 g aproximadamente en cápsulas de aluminio y cada una fue introducida en este equipo hasta obtener masa constante. Seguidamente, estas muestras se colocaron en una mufla a 550 °C hasta masa constante, para obtener los sólidos volátiles,

pues la pérdida de masa durante la calcinación corresponde al contenido en SV de la muestra. La masa seca se expresa como porcentaje de la masa total de la muestra y el contenido en sólidos volátiles como porcentaje de la MS de la muestra, por lo que se hizo uso de la Ecuación 1 y Ecuación 2, respectivamente.

$$\%M_s = \frac{M_{\Sigma}}{M_H} \times 100 \quad (1)$$

$$\%SV = \frac{M_R}{M_S} \times 100 \quad (2)$$

Donde,

$M_S$ : Masa seca de la muestra (g)

$M_H$ : Masa húmeda de la muestra (g)

$M_R$ : Masa remanente de la muestra después de la calcinación (g)

### 3.1.3 Materiales de ensayo: polímeros

Para la selección de los materiales de ensayo a analizar, se realizó una búsqueda bibliográfica con el propósito de encontrar plásticos compostables, ya que la norma tiene esta afinidad. Sin embargo, no se limita a estos, por lo que también se decidió trabajar con otro tipo de polímero para poder contrastar. Después de la revisión documental apoyada en artículos científicos e investigaciones relevantes, se tomó la decisión de trabajar con el polímero PLA y con oxobiodegradables. En la Figura 3.1 se observan los plásticos utilizados en esta investigación y en la Tabla II se presentan algunas características de estos.



**Fig. 3.1.** Presentación de los polímeros utilizados en la investigación. (a) Envase de PLA. (b) Bolsas de basura oxobiodegradables.

**TABLA II**  
**CARACTERÍSTICAS DE LOS POLÍMEROS**  
**ANALIZADOS EN EL MÉTODO**  
**DE ENSAYO**

<b>Polímero</b>	<b>Fuente</b>	<b>Color</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Marca</b>	<b>Distribuidor</b>
Ácido Poliláctico (PLA)	Almidón de maíz	Transpa- rente	Empaque de alimentación	Vegware	Ecológica
Oxobiode- gradable	Combusti- bles fósiles	Verde	Bolsa de basura	Zesta	Walmart

Nota: Características de los polímeros analizados en el método de ensayo de la investigación.

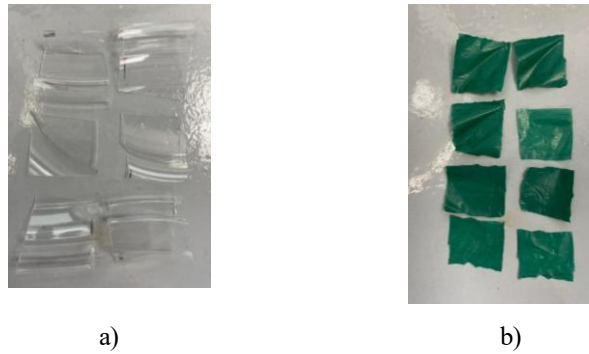
### **3.2 MÉTODO DE ENSAYO SEGÚN LA NORMA INTE/ISO 20200:2020**

#### **3.2.1 Preparación del residuo sólido sintético y de los reactores de compostaje**

Se prepararon 6000 g de RSS, en un recipiente con capacidad de 32 L. La Tabla III especifica las cantidades utilizadas de cada componente para el RSS, los cuales se mezclaron manualmente para integrar todos los componentes. La masa seca de cada uno se calculó multiplicando el porcentaje de cada componente por el total de la masa seca de todo el RSS. La mezcla del RSS se dividió en 6 cajas de plástico polipropileno de 5 L, con medidas de 22 cm x 14 cm x 16 cm (largo, ancho y alto), los cuales se denominarán reactores de compostaje, pues se utilizarán para el proceso de compostaje; cada uno contenía 1000 g de la mezcla. Para facilitar un intercambio de gases, se realizó un orificio de 5 mm de diámetro en los lados de 14 cm, a 13 cm del fondo. Se añadió a cada reactor, 550 g de agua destilada aproximadamente, para ajustar el contenido final de agua al 55%.

A cada reactor se les agregó 5 g de material de ensayo y, se mezclaron con el RSS. Los reactores 1, 2 y 3 contenían el polímero PLA y los reactores 4, 5 y 6 los polímeros oxobiodegradables. Se registró la masa inicial de cada reactor. Por último, se procedió a colocar las tapas a cada uno y a sellarlas con cinta adhesiva para evitar una evaporación excesiva. La Figura 3.2 muestra la caja donde se prepararon los 6000 g de RSS (a) y los reactores utilizados para el proceso de compostaje (b). Todo lo anterior tomó lugar en el Laboratorio de Investigación del CEQIATEC.





**Fig. 3.3.** Polímeros en fragmentos de 2,5 x 2,5 cm utilizados en el análisis del proceso de compostaje. (a) Polímero PLA. (b) Polímero oxobiodegradable.

### 3.2.3 Proceso de compostaje según la norma INTE/ISO 20200:2020.

Una vez listos los reactores de compostaje, se introdujeron en un horno con circulación de aire marca Across International modelo FO-19240, a una temperatura de  $(58,0 \pm 0,1)$  °C, ubicada en las oficinas entre el Laboratorio de Aguas Potables y el Laboratorio de Investigación del CEQIATEC. A este período se le denomina período de incubación termofílico, el cual tuvo una duración de 45 días (7 semanas). Este período debe durar entre 45 y 90 días; se trabajó con el tiempo mínimo porque el objetivo del proyecto no está enfocado en el éxito de la desintegración de los polímeros y con este tiempo es posible recolectar los datos e información necesaria para desarrollar el objetivo de la investigación.

Durante el proceso, se mantuvo condiciones ambientales adecuadas para garantizar un buen compostaje. Para ello, se llevó a cabo el procedimiento de la Tabla IV que describe la norma, la cual permite airear la materia de compostaje mientras se mantenga un contenido suficiente de agua. Se realizó el procedimiento de esta forma, salvo los días 4, 11, 18 y 25, ya que coincidían en fines de semana.

En cada período programado, según la Tabla IV, se pesó cada reactor en una balanza granataria marca Adam Equipment, modelo NBL-40021 y se agregó agua destilada restituyendo la masa inicial. Después del día 30, se restituyó la masa al 80%; justo ese día no hubo necesidad de añadir agua porque el peso de los reactores fue mayor del que se debía restituir. En el Apéndice 1 se expone los detalles de control de cada día del procedimiento.

La mezcla de la materia de compostaje se realizó con una espátula de laboratorio, con mucha precaución para no dañar los fragmentos del material de ensayo. Durante este proceso, se tomaron datos de parámetros de diagnóstico, tales como el aspecto visual y olor de cada reactor.

**TABLA IV**  
**PROCEDIMIENTO DE COMPOSTAJE PARA EL PERÍODO**  
**DE INCUBACIÓN TERMOFÍLICO**

Días	Operación
0	Se registró la masa inicial del reactor
1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14	Se pesó el reactor y, si fuera necesario, se añadió agua para restituir la masa inicial. Se mezcló la materia de compostaje.
8, 10, 16, 18, 21, 23, 25, 28	Se pesó el reactor y, si fuera necesario, se añadió agua para restituir la masa inicial. No se mezcló la materia de compostaje.
30, 35, 37, 42, 45	Se pesó el reactor y, si fuera necesario, se añadió agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcló la materia de compostaje.

Nota: Operación realizada para cada día del procedimiento de compostaje en el período de incubación termofílico.

### 3.2.4 Terminación del método de ensayo

Al transcurrir los 45 días del procedimiento de compostaje, se retiró la tapa de cada reactor y se introdujeron en un horno con circulación de aire a  $(58,0 \pm 0,1)$  °C, para secar los contenidos, dicho proceso finaliza hasta obtener masa constante.

El compost de cada reactor se tamizó con tamices normalizados de 9,50 mm, 4,75 mm y 2,00 mm, respectivamente, obtenidos del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA). Los grumos se trituraron con mucho cuidado para no deteriorar ningún fragmento residual del material de ensayo existente en él. Al realizar esta parte del procedimiento, se examinó la fracción que no pasa a través de cada tamiz y al final se reunieron los fragmentos recuperados. El material de ensayo recogido de las diversas fases del tamizado se limpió de compost sumergiéndolo en agua. Este paso debe de realizarse con suma precaución para evitar la pérdida de material de ensayo. Por último, el material de ensayo se secó en un horno de secado a vacío a  $(40 \pm 1)$  °C hasta obtener masa constante y se registró la masa de estos correspondiente a cada reactor.

### 3.2.5 Parámetros de diagnóstico para el compost final

Se tomó una muestra de 500 g del reactor 1 (polímero PLA) y del reactor 4 (polímero

oxobiodegradable) para analizar la relación carbono:nitrógeno (C/N). Este análisis se realizó solo para dos reactores, uno de cada polímero, ya que para fines de esta investigación no era necesario invertir para los seis reactores. Al igual que las muestras iniciales, este análisis se realizó en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Además, se tomó una muestra de 2 g de cada reactor para la determinación de masa seca y sólidos volátiles, lo cual se llevó a cabo de la misma forma que las muestras iniciales. El pH fue calculado en muestras de 15 g de cada reactor, mezcladas con 75 g de agua (relación 1:5), con el mismo equipo utilizado en las muestras iniciales.

### **3.3 MEDICIÓN DEL GRADO DE DESINTEGRACIÓN DE LOS MATERIALES DE ENSAYO SEGÚN LA NORMA INTE/ISO 20200:2020 Y VERIFICACIÓN DE SU VALIDEZ**

#### **3.3.1 Cálculo del grado de desintegración**

Este cálculo se expresa en porcentaje mediante la Ecuación 3. Es importante mencionar que el material plástico recuperado del proceso de tamizado se considera material no desintegrado y el material que ha atravesado los tamices se considera material desintegrado. El grado de desintegración se calcula para cada reactor, independientemente.

$$D = \frac{m_i - m_r}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

Donde,

$m_i$ : masa seca inicial del material de ensayo (g).

$m_r$ : masa seca del material de ensayo residual recuperado del tamizado (g).

### 3.3.2 Cálculo de la disminución en contenido de los sólidos volátiles

Como parte de la validez del ensayo, se debe calcular la disminución en contenido de los sólidos volátiles en los reactores, mediante la Ecuación 4.

$$R = \frac{[m_i \times (DM)_i \times (VS)_i] - [m_f \times (DM)_f \times (VS)_f]}{[m_i \times (DM)_i \times (VS)_i]} \times 100 \quad (4)$$

Donde,

$m_i$ : masa inicial del residuo sintético húmedo introducido en el reactor.

$(DM)_i$ : porcentaje de masa seca inicial del residuo sintético expresada en decimales.

$(VS)_i$ : porcentaje del contenido inicial en sólidos volátiles del residuo sintético, expresado decimales.

$m_f$ : masa final del compost.

$(DM)_f$ : porcentaje de masa seca final del compost, expresada en decimales.

$(VS)_f$ : porcentaje del contenido final en sólidos volátiles del compost, expresado en decimales.

### 3.3.3 Informe del ensayo

Este documento se llevó a cabo con la información correspondiente a la metodología aplicada, los materiales y equipo utilizado, así como las variaciones realizadas al método descrito. Además de los resultados obtenidos a lo largo de los 45 días del ensayo, los análisis y cálculos aplicados. Este documento cumple el orden descrito en el apartado 14 “Informe del ensayo” de la norma *INTE/ISO 20200:2020* y se presenta en el Anexo 1.

### **3.4 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA INTE/ISO 20200:2020 EN EL CEQIATEC**

#### **3.4.1 Estudio preliminar de mercado**

Esta sección se decide titular como estudio “preliminar” dado que el análisis no abarca de forma integral todos los elementos de un estudio de mercado exhaustivo. Este enfoque responde al análisis del contexto actual del tema en cuestión, revisión documental, incluyendo la legislación actual del país y entrevistas puntuales. Se muestra una primera aproximación de la viabilidad del servicio de la norma *INTE/ISO 20200:2020* en el mercado costarricense.

Se realizó una entrevista al coordinador del CEQIATEC, y a la directora de normalización de INTECO. Ambas se llevaron a cabo mediante entrevistas virtuales, donde se dio respuesta a distintas preguntas formuladas previamente. Esta primera tuvo la finalidad de conocer su posición con respecto a la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020* específicamente en este laboratorio. La segunda entrevista tuvo el mismo objetivo que la anterior, y aportó información adicional vinculada con la importancia de expandir la capacidad de laboratorios en Costa Rica y poder abrir paso al avance en temas de legislación para plásticos no convencionales. Además, la necesidad/beneficio que implica lo anterior para el país, desde su perspectiva.

Las entrevistas se encuentran en el Apéndice 2 y Apéndice 3, respectivamente.

#### **3.4.2 Estudio técnico-operativo**

Con el fin de llevar un orden del estudio aplicado para poder corroborar todos los requerimientos técnicos y operativos, se elaboró un diagrama enumerando los principales procedimientos del método de ensayo. Además, durante el proceso experimental, se desarrolló una bitácora de tiempo para cada actividad, la cual se muestra en el Apéndice 4. Lo anterior permitió identificar los equipos, materiales, recurso humano y tiempo que demandó cada etapa del método bajo estudio. Sumando así, las recomendaciones necesarias para la viabilidad técnica y operativa de la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020* en el CEQIATEC.

### 3.4.3 Estudio ambiental

Para determinar el impacto ambiental del método de ensayo de la norma bajo estudio, se llevó a cabo un balance de energía y un Inventario de Gases de Efecto Invernadero. Para este primero, se dividió toda la metodología en cuatro procesos y se identificaron los equipos utilizados en cada uno, así como su marca y modelo. La energía estimada (kWh) se calculó mediante la Ecuación 5 [58]. El potencial nominal (kW) de cada equipo se obtuvo del manual de cada uno. Se realizó un gráfico circular representando la distribución porcentual de la energía consumida estimada durante cada proceso, a partir del balance de energía mostrado en el Apéndice 5.

$$Energía = Potencia \times Tiempo \times Cantidad\ equipo \quad (5)$$

Donde,

*Energía* : Energía estimada de cada equipo, en kWh.

*Potencia* : Potencia nominal de cada equipo, en kW.

*Tiempo* : Tiempo de operación del equipo, en horas.

*Cantidad equipo* : Número de equipos del mismo tipo.

En el Inventario de Gases de Efecto Invernadero, detallado en el Apéndice 6, se incluyeron las fuentes de residuos orgánicos y electricidad. Se utilizaron los potenciales de calentamiento global y los factores de emisión del IMN del 2024 para el sector electricidad y el sector de residuos en el tratamiento de compost, el cual genera metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (NO<sub>2</sub>) [60]. Para el cálculo de las tCO<sub>2e</sub> en cada fuente, se aplicó la Ecuación 6 [59]. El dato de actividad de los residuos orgánicos se obtuvo mediante la suma de la masa de compost final de todos los reactores y para la electricidad, el dato de consumo energético durante los 45 días del procedimiento de la metodología aplicada.

$$Emisión = CG \times FC \times PCG \quad (6)$$

*CG* : Consumo o generación de la fuente de emisión

*FC* : Factor de emisión

*PCG* : Potencial de calentamiento global

#### 3.4.4 Estudio económico

Con el objetivo de analizar la viabilidad económica de la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020* en el CEQIATEC, se desarrollaron tres escenarios. El primero de estos no contempla la adquisición de un horno con circulación de aire, se hace el supuesto que el equipo actual se puede utilizar para el propósito de la norma y su capacidad es suficiente, solo se agrega los filtros de carbón activado como método de tratamiento de gases y olores. El segundo escenario toma en cuenta la compra de un horno con circulación de aire idéntico al actual, ya que este se utilizaría para otros fines. En el último escenario, se supone la compra de un equipo distinto al anterior, que cumpla la misma función, pero con mayor capacidad, por ende, de mayor precio; una incubadora con flujo de aire con el doble de volumen que el horno actual.

De esta manera, para los tres escenarios se realizó lo siguiente: análisis de los costos iniciales para la implementación del proyecto, los costos operativos al ejecutar 1 servicio de la norma en cuestión, es decir, para 1 material de ensayo (1 polímero) y los flujos de efectivo del proyecto. Este primer análisis se divide en costos de implementación de la norma (acreditación y capacitación al personal), materiales, equipo y costos por contingencias. Para los costos de acreditación se toma como referencia la información proporcionada por el ECA [53] y para los costos de capacitación, se toma como referencia los costos de la norma *ISO 9001*, ya que, de acuerdo con INTECO, no se tienen programadas en el corto plazo capacitaciones para la norma bajo estudio.

En los costos operativos se incluye costos por la operación de un único servicio de la norma y costos fijos que se deben pagar mensualmente independientemente de la cantidad de servicios que se ejecuten. Dentro de los costos por servicio se encuentra el recurso humano, materiales, y análisis de parámetros de diagnóstico. Los costos por recurso humano fueron consultados al coordinador del CEQIATEC. En los costos fijos se contempla los costos energéticos y los costos por sistema de extracción de gases.

Por último, se llevó a cabo los flujos de efectivo, para el cual se toma como horizonte del proyecto un periodo de 6 meses, desde julio 2025 hasta diciembre 2025. Para la tasa mínima atractiva de retorno (TMAR), se define que es 12% anual/anual, sin embargo, al considerarse solo 6 meses, la tasa a utilizar es de 6% y si se considera por mes esta será del 1%. Este índice está sujeto a criterio del inversionista; no obstante, una TMAR entre el (10-15)% se considera

razonable para evaluaciones financieras [56].

La proyección se realizó a un horizonte de 6 meses, en atención a las necesidades y criterios de las partes interesadas del proyecto. Esta decisión se fundamentó en que un análisis a corto plazo permite una estimación más realista y ajustada a las condiciones actuales. Esta decisión responde también a que el servicio se encuentra en una fase piloto y a la limitada disponibilidad de datos para realizar estimaciones de mayor plazo.

Además, se aplicaron los índices de bondad financiera [56]: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y período de recuperación. En el país no se encuentran referencias del costo aproximado del servicio en cuestión, ya que ningún laboratorio consta del mismo, por lo que la manera de ejecutar el análisis del flujo neto de efectivo fue establecer un cierto ingreso que diera como resultado la obtención de ganancias suficientes para lograr que los escenarios propuestos sean económicamente viables para el CEQIATEC. De esta forma, se plantean tres posibles escenarios que permiten a la empresa estimar un rango referencial del monto por servicio, con el fin de que el proyecto sea factible, en función de los lineamientos y supuestos considerados en la presente investigación.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 PARÁMETROS DE DIAGNÓSTICO DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE




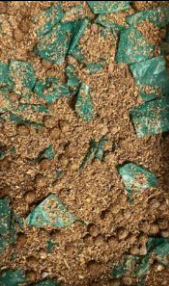



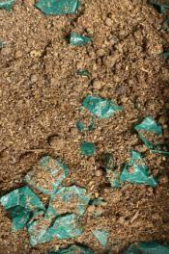
#### 4.1.1 Valoración organoléptica de los reactores durante el análisis de compostaje

Al inicio, el aspecto visual de los reactores de compostaje era de un color café claro, porque predominó el color del aserrín, ya que era el componente de mayor cantidad en la mezcla. Al tercer día, se observó un cambio a café ligeramente más oscuro. El cambio de coloración es parte del proceso de maduración del compostaje; entre más se extienda este período, más se intensifica el color café [61]. No obstante, la variación de color a lo largo de todo el proceso no presentó gran cambio, como se muestra en la Tabla V.

Con respecto al olor, durante la primera semana del proceso, se percibió un ligero olor ácido porque en la fase inicial hay una fermentación donde los materiales más fácilmente degradables como azúcares y almidones se descomponen, además, se generan ácidos orgánicos volátiles [62]. Al transcurrir cinco días aproximadamente, se convirtió en olor amoniacal, el cual aumentó considerablemente durante la semana 2. Las bacterias termofílicas descomponen proteínas y otros compuestos nitrogenados, como la urea presente en el RSS, transformando el nitrógeno en amoníaco [62]; este es volátil y tiene un olor fuerte.







Después de estos primeros 15 días, se registró “olor a tierra”, ya que algunas bacterias producen una sustancia denominada geosmina. El aspecto del producto final de un compostaje se espera que sea similar a tierra, tanto en color como en olor [6] tal como sucedió, con excepción a los reactores en los que se notó el crecimiento fúngico.

**TABLA V**  
**ASPECTO VISUAL Y OLOR DE LOS REACTORES DURANTE**  
**LAS SIETE SEMANAS DEL PROCESO**  
**DE COMPOSTAJE**

Semanas	Aspecto visual		Olor
	Reactores con PLA	Reactores con POX	
1			Ácido
2			Amoniacal
3			Olor a tierra: R1, R2, R3, R4 y R6 Olor a moho: R5
4			Olor a tierra: R1, R2, R3, R4 Olor a moho: R5 y R6

Nota: Aspecto visual y olor de los reactores de compostaje en cada semana del proceso.

Continuación de la Tabla V.

Semanas	Aspecto visual		Olor
	Reactores con PLA	Reactores con POX	
5			<p>Olor a tierra: R1, R3 y R4</p> <p>Olor a moho: R2, R5 y R6</p>
6			<p>Olor a tierra: R1</p> <p>Olor a moho: R2, R3, R4, R5 y R6</p>
7			<p>Olor a tierra: R1</p> <p>Olor a moho: R2, R3, R4, R5 y R6</p>

Nota: Aspecto visual y olor de los reactores de compostaje en cada semana del proceso.

A lo largo del proceso de compostaje, los reactores sufrieron la presencia de hongo en exceso. El primer reactor en evidenciar crecimiento de moho fue en el R5, en la semana 3, seguido del R6 en la semana 4, sumándose así cada reactor en las siguientes semanas (como se muestra en la Tabla IV), salvo el R1 que hasta el final del procedimiento no mostró presencia de moho. A medida que el hongo crecía en los reactores y se propagaba progresivamente en todo el RSS, el aspecto visual y olor variaron. Se registró un color café oscuro, con puntos blancos, muy seco y árido, como se observa en la Figura 4.1. y el olor a moho predominó.

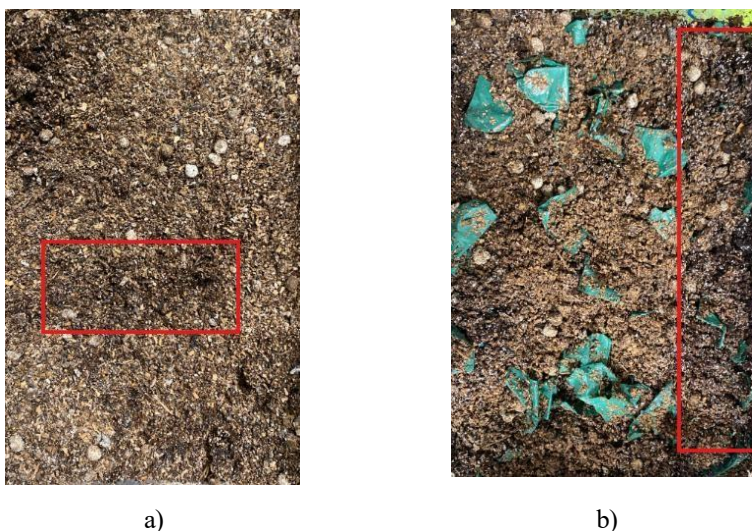
A pesar de que el procedimiento de compostaje se realizó como lo describe el método de ensayo de la norma *INTE/ISO 20200:2020*, hay algunos aspectos que pueden explicar el

crecimiento fúngico excesivo. El RSS ocupó casi todo el volumen de los reactores, siendo así un obstáculo para una correcta oxigenación y posiblemente, la humedad se acumuló; como evidencia a lo anterior, se observó las paredes y la tapa de los reactores llenas de gotas de agua y al abrirlos se percibía una sensación de humedad estancada. Los hongos crecen y se reproducen en ambientes con elevada humedad [35]. A raíz de lo anterior, se recomienda utilizar reactores de mayor volumen o realizar más perforaciones en ellos, para asegurar suficiente intercambio de aire interno, mejorar la ventilación y reducir la humedad.

Otro aspecto asociado a la problemática en cuestión es que, si no se alcanzó una fase termofílica inicial fuerte en el interior de los reactores, existe la posibilidad de que los hongos termotolerantes colonizaran el RSS antes de que las bacterias termofílicas lo hicieran, dando paso libre al crecimiento de los hongos [34]. A pesar de que la temperatura reportada por el horno se verificó todos los días de operación en  $(58,0 \pm 0,1)$  °C, se considera que la utilización de un termómetro sería de gran utilidad para monitorear la temperatura real en cada reactor de compostaje, de esta manera, se tendría un mejor control del procedimiento.

Relacionado a esto, si el calor no se distribuyó uniformemente en ciertas zonas del reactor, los hongos pudieron proliferar antes de que la temperatura los eliminara. Lo anterior podría dar razón a que la aparición de moho inició en los bordes de los reactores, por lo que es importante corroborar la temperatura en diferentes puntos del reactor; esta variable puede afectar significativamente la eficiencia del proceso, así como la humedad y oxigenación [28].

Por último, se aconseja verificar que los componentes iniciales del RSS sean libres de patógenos y exponer el compost y el aserrín a temperaturas superiores a 55 °C durante 5 a 15 días para reducir o eliminar el número de patógenos microbianos [5], pues se abre la posibilidad de que alguno de estos trajera consigo una contaminación de moho. Asimismo, la debida precaución con respecto a la manipulación, para evitar una contaminación cruzada entre reactores. Con esto se asegura la obtención de un producto higienizado (sometido a proceso de esterilización para eliminar patógenos o sustancias indeseables [63]). No obstante, es importante aclarar que la norma bajo análisis no menciona la esterilización de ningún componente o del compost.



**Fig. 4.1. Aspecto visual de los reactores de compostaje con presencia de hongo. (a) Reactor con polímero PLA. (b) Reactor con polímero oxobiodegradable.**

#### **4.1.2 Análisis químico inicial del residuo sólido sintético y del compost final de los reactores**

Los parámetros químicos de pH y la relación C/N son variables vinculadas a la calidad y rendimiento óptimo del proceso de compostaje [28]. La Tabla VI contiene los valores de los análisis químicos realizados a la mezcla inicial de RSS y al compost final de cada reactor. Cabe resaltar, que el análisis de relación C/N se aplicó sólo en los reactores R1 y R4, ya que dichos análisis se debían contratar externamente, por lo que aplicarlo en los seis reactores aumentaría los costos y extendería el proceso, además, esto no interfiere en el objetivo de la investigación. Siendo así, se tomó la decisión de escoger muestra del R1 que contenía polímeros de PLA y no evidenciaba presencia de moho y del R4 en representación a los reactores con polímeros oxobiodegradables y con moho presente.

En un proceso de compostaje, se espera que al inicio el pH esté en valores cercanos entre (4,5-5), conforme avanza el proceso, el pH aumenta debido a la degradación y mineralización de los compuestos orgánicos, luego se neutraliza con valores cercanos a 7 [28]. Lo anterior se ve reflejado en todos los reactores, con excepción al R1. Este es el único que presenta un pH bajo y coincide en ser el único sin poseer hongo, a diferencia del resto donde su pH se posiciona entre (7-8); según Castrillón et al. [64] los mohos tienen un crecimiento óptimo en ambientes con un pH aproximado de 8. Por otra parte, pese a que la mezcla inicial del RSS era la misma, así como las condiciones de operación de todos los

reactores, pudo haber diferencias en la composición inicial de microorganismos, en la materia presente; también la existencia de microambientes en cada uno de los reactores, favoreciendo más en unos el crecimiento de hongos y en otros el de bacterias acidificantes.

En cuanto al análisis de relación C/N para el RSS inicial, se ubica en una relación próxima a 20:1; esta debe estar comprendida entre 20:1 y 40:1 [14], por lo que no fue necesario modificar la concentración de urea para ajustar la relación C/N al intervalo requerido. Este parámetro cumplió con los valores óptimos para el proceso de compostaje, sin evidenciar exceso de carbono ( $C/N > 35$ ) o de nitrógeno ( $C/N < 35$ ) [28]. El R1 presentó un valor final similar a la inicial en este parámetro, por el contrario, el R4 indicó una disminución de C/N, el cual es un indicador de madurez del compost y valores bajos indican mayor degradación del material inicial. Lo anterior coincide con el valor de pH alto en este reactor, pues un pH elevado se atribuye a presencia significativa de nitrógeno [28]. Tomando en cuenta los factores de pH y relación C/N, se podría determinar que hubo mayor actividad microbiana en los reactores que evidenciaron presencia de hongo.

**TABLA VI**  
**ANÁLISIS QUÍMICOS DEL RESIDUO SÓLIDO SINTÉTICO**  
**INICIAL Y DEL COMPOST FINAL DE LOS**  
**REACTORES DE COMPOSTAJE**

Reactores	Material ensayo	pH		Relación C/N	
		Inicial	Final	Inicial	Final
R1	PLA	5,99	4,78	19,2	22,00
R2	PLA	5,99	7,81	19,2	-
R3	PLA	5,99	7,72	19,2	-
R4	Oxobiodegradable	5,99	8,13	19,2	16,31
R5	Oxobiodegradable	5,99	7,61	19,2	-
R6	Oxobiodegradable	5,99	7,94	19,2	-

Nota: Valores de los análisis químicos del residuo sólido sintético inicial y del compost final de cada reactor.

Cabe señalar que, por falta de espacio en el horno utilizado para la operación del proceso, no se llevó a cabo un tratamiento de control, es decir, reactores de compostaje con la misma composición y operación, pero sin la presencia de polímeros. Tener una línea base

permite establecer una comparación de las variables que influyen en el proceso de compostaje y el comportamiento de la actividad microbiana en presencia o ausencia de material polimérico. Asimismo, se puede efectuar una comparación de la pérdida de masa entre los reactores con plásticos y los de control, permitiendo evaluar la pérdida de material debido al compostaje natural y la pérdida específica de los materiales analizados. Otro aspecto relevante es que se puede analizar el efecto de la degradación de polímeros degradables en la composición del compost y comparar con el producto final de los tratamientos de control. Lo anterior se puede realizar mediante la aplicación de indicadores de calidad como contenido de humedad, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), azufre (S), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B) [5].

## **4.2 VERIFICACIÓN DE LA VALIDEZ DEL ENSAYO REALIZADO SEGÚN LA NORMA INTE/ISO 20200:2020**

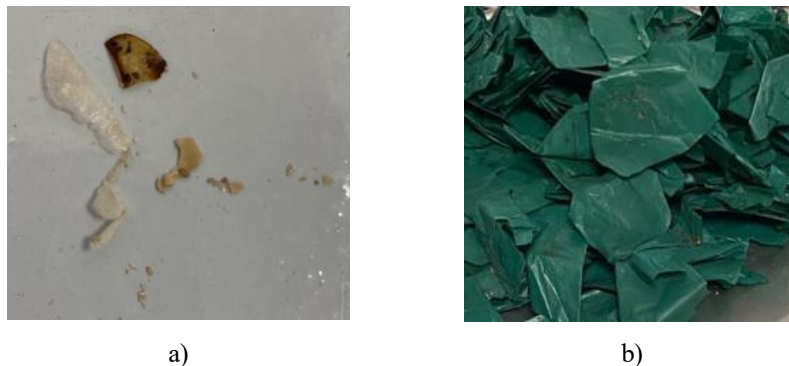
### **4.2.1 Grado de desintegración de los polímeros**

Después de iniciado el proceso de compostaje, en la semana 3 se observó que los polímeros de PLA se estaban desintegrando, pues los fragmentos eran mucho más pequeños que los introducidos al inicio, sin embargo, hasta la semana 7 se evidenció visualmente la degradación por completo. En el caso de los polímeros oxobiodegradables, se continuaron mostrando iguales al día 0, es decir, no se observó ninguna desintegración. La Figura 4.2 contiene los polímeros recuperados al final del proceso. En la Tabla VII se exponen los resultados del grado de desintegración del ME. Para el PLA, la media de las tres réplicas fue de un 97,32%, ya que se encontraron pequeñas cantidades de polímero en el R1; se puede complementar este resultado con lo expuesto en la sección anterior en relación con la mayor actividad microbiana en los reactores con presencia de hongo en exceso, calzando así el 100% de la desintegración de PLA en los reactores R2 y R3, los cuales tenían moho presente. Sin embargo, la variabilidad fue de 8,05%, posicionándose por debajo del 20% que menciona la norma. Con respecto a los reactores con plásticos oxobiodegradables, el promedio del grado de desintegración fue de 0%. Se encuentran valores negativos en el resultado del R5 y R6 a razón de la humedad contenida el ME, no obstante, visualmente y después del proceso de tamizado, se recuperó todo el material oxobiodegradable. Según la norma *UNE-EN*

13432:2001/AC:2005, la descomposición de los polímeros se considera satisfactoria si permanece un máximo del 10 % de su masa seca original [5]. Examinando los resultados de la Tabla VII, el PLA presentó un 8,05% de su masa seca inicial, obteniendo una descomposición satisfactoria mediante compostaje termofílico en un plazo de 45 días, en condiciones controladas de laboratorio. Los resultados anteriores coinciden con los esperados, pues se proyectaba que el PLA tuviera éxito en su desintegración por sus características de biodegradabilidad y compostabilidad [20], a diferencia del plástico oxobiodegradable, donde ha demostrado ser resistente a la desintegración en ambientes de compostaje [26].

Cabe señalar que, el método de ensayo de la norma en estudio da a conocer el grado de desintegración de polímeros basándose en el proceso físico que implica la fragmentación del material plástico en el compost final, tomando en cuenta únicamente el material recuperado mayor a 2 mm de diámetro, pues este es el tamaño de malla utilizado en la última fase del tamizado. Es decir, con esta metodología no se conoce la cantidad de material plástico que logró atravesar el último tamiz; en ese caso se ocuparían otras pruebas para el análisis de plástico contenido en el compost final.

Asimismo, para evaluar específicamente la desintegración de los plásticos en distintas etapas del método de ensayo, se recomienda aplicar pruebas de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC) [5]. La norma *INTE/ISO 20200:2020* no solicita la realización de estos análisis; sin embargo, se mencionan como opción en caso de que se desee ampliar el estudio sobre la desintegración de polímeros.



**Fig. 4.2. Aspecto visual de los polímeros recuperados al finalizar el proceso de compostaje. (a) Polímero PLA. (b) Polímero oxobiodegradable.**

**TABLA VII**  
**GRADO DE DESINTEGRACIÓN DE LOS POLÍMEROS**  
**DE CADA REACTOR DE COMPOSTAJE**

Reactores	Masa inicial del ME (g)	Masa residual del ME recuperado (g)	Grado de desintegración (%)	Promedio del grado de desintegración (%)
R1	5,34	0,46	91,95	
R2	5,07	0	100	97,32
R3	5,08	0	100	
R4	5,00	5,01	0	
R5	5,00	5,04	-1	0
R6	5,00	5,03	-1	

Nota: Datos del material de ensayo para el cálculo del grado de desintegración de cada reactor y del promedio de las tres réplicas correspondiente a los distintos polímeros.

#### 4.2.2 Disminución del contenido de los sólidos volátiles

Al realizar los cálculos de la disminución de sólidos volátiles entre el RSS inicial y el compost final, el único reactor que se posee un R (%) conforme a lo descrito en la norma es el reactor 1, ya que es superior al 30%. El R promedio para los tratamientos de PLA es de 26,90% y para los POX es de -78,80%. En la Tabla VIII se observa que para el resto de los reactores el valor no fue el esperado. El crecimiento excesivo de moho pudo haber aumentado la cantidad de biomasa presente en los reactores, provocando una mayor cantidad de sólidos volátiles al final del ensayo [65]. En condiciones normales, los microorganismos degradan la materia orgánica eficientemente; en este caso el moho dominó el RSS afectando la disminución normal de dicho parámetro. Sumado a esto, la presencia de moho pudo interferir en la absorción de humedad [35], reteniendo agua y alterando el cálculo de la masa seca, el cual influyó en el resultado de SV. En contraste, se muestran los valores del reactor 1 donde la reducción de sólidos volátiles sí cumple con el mínimo porcentaje y se vincula con la ausencia de moho en el RSS.

**TABLA VIII**  
**DISMINUCIÓN DE LOS SÓLIDOS**  
**VOLÁTILES TOTALES**

Reactores	Inicial			Final			R (%)
	Masa inicial de RSS (g)	*Masa seca inicial de RSS (%)	**Sólidos Volátiles de RSS inicial (%)	Masa final del compost (g)	Masa seca final del compost (%)	Sólidos Volátiles del compost (%)	
R1	1512,75	14,55	55,93	779,73	10,84	31,82	78,16
R2	1358,63	14,55	55,93	636,12	28,08	70,18	-13,34
R3	1420,48	14,55	55,93	712,00	26,83	50,91	15,89
R4	1460,19	14,55	55,93	735,56	34,48	78,57	-67,68
R5	1426,69	14,55	55,93	691,32	38,92	81,01	-87,68
R6	1353,31	14,55	55,93	655,29	37,68	80,77	-81,05

Nota: Resultado de la disminución de los sólidos volátiles totales de cada reactor de compostaje.

\* La masa seca (MS) se expresa como porcentaje de la masa total de la muestra

\*\* El contenido en sólidos volátiles (SV) se expresa como porcentaje de la MS de la muestra.

Por definición de la norma *INTE/ISO 20200:2020*, los resultados expuestos en el apartado 4.2.1 y 4.2.2, deben cumplir dos criterios para confirmar la validación del ensayo aplicado: una disminución del contenido en sólidos volátiles igual o superior al 30% y una variabilidad igual o menor al 20% en el resultado de los grados de desintegración en las tres réplicas de cada material plástico [17]. Dado a lo anterior, el ensayo se considera inválido para los tratamientos de PLA y POX, al cumplir sólo con uno de los dos requisitos mencionados.

A pesar de lo anterior, un mayor control en las variables que afectan el proceso de compostaje puede dar un resultado positivo en cuanto a la degradación de polímeros PLA. Según Torrez [5], en un estudio enfocado en la degradación de biopolímeros, después de aplicar el método de ensayo de la norma *UNE-EN ISO 20200:2015* y, además realizar análisis cualitativos (SEM, FT-IR, TGA, DSC) de la biodegradación de los biopolímeros mediante compostaje, se evidenció que el PLA muestra un alto potencial para ser biodegradado en condiciones de compostaje a temperaturas termofílicas de 58 °C.

### **4.3 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA INTE/ISO 20200:2020**

La factibilidad de este estudio se basa en el simulacro de ensayo de laboratorio que se realizó para el análisis de dos materiales de ensayo (polímeros) distintos, en el tiempo mínimo que describe el método de la norma *INTE/ISO 20200:2020* y de la forma que se presenta en la metodología de esta investigación, cuyos resultados fueron discutidos en las secciones 4.1 y 4.2. Se incluye la proyección al tiempo máximo del método para ciertas secciones del estudio de factibilidad. Adicionalmente, los datos e información presentada son corroborados en el presente año, 2025.

#### **4.3.1 Estudio preliminar de mercado**

Dentro de este estudio, se realiza una evaluación general del marco regulatorio, institucional y productivo en Costa Rica. Exponiendo, a grandes rasgos, la demanda del servicio, la oferta y otros aspectos que demuestren la viabilidad de la aplicación de la norma *INTE/ISO 20200:2020*.

En Costa Rica, la industria del plástico ha incorporado opciones sostenibles en la última década, como alternativa a lo convencional. Se realizó una proyección nacional donde la producción de bioplásticos biodegradables crecería un 7% por año entre el 2018 y el 2023 [37]. En el 2019, se creó la empresa DosMil50 que se encarga del diseño y producción de biomateriales, implementación de estrategias de gestión de bioplásticos, servicios de compostaje industrial y degradación de materiales [66]. A pesar de no ser la única en el país dedicada a esto, resalta su mención al inaugurar una planta de conversión de bioplásticos en el año 2024, siendo una de las primeras de su tipo en Latinoamérica, buscando la transición a una producción sostenible [67]. Costa Rica muestra compromiso en este ámbito, abriendo oportunidades para alternativas plásticas amigables, tanto en el mercado local como internacional [37]; por lo que dicha industria presenta un crecimiento alineado con las tendencias globales con relación a la sostenibilidad.

La elaboración completa del Reglamento Técnico del Ministerio de Salud para la Ley N°9786, con respecto a bolsas plásticas, se encuentra en proceso de discusión al año 2025, pues la efectividad de este sistema ha encontrado limitaciones relacionadas a la ausencia de

infraestructura y laboratorios equipados para la implementación de procesos de certificación y otras herramientas que permitan aprobar o no productos de cierto material [68]. Por lo que es necesario tener la certeza si es posible llevar a cabo metodologías internacionales de este tipo en algún laboratorio del país, ya que, según los registros del Ente Costarricense de Acreditación (ECA), no hay laboratorios acreditados que tengan la norma *INTE/ISO 20200:2020* o similares [50]. Es relevante mencionar que, como parte de las metas de uno de los objetivos establecidos en el Plan Nacional de Residuos Marinos, es impulsar la infraestructura adecuada en laboratorios del país para llevar a cabo pruebas bajo normas establecidas a los materiales utilizados como alternativa a los plásticos convencionales [3].

Se realizó una entrevista (Apéndice 2) al coordinador del CEQIATEC, para conocer su opinión con respecto a la implementación de la norma en cuestión. Su posición evidencia la importancia de poseer este tipo de normativas, ya que es necesario poder cualificar las materias primas comercializadas y utilizadas en el país, con respecto a su capacidad de degradación; aún más tomando en cuenta que actualmente no hay laboratorios realizando este análisis en el país. Además, poder contar con normativas y certificaciones que hagan constar la biodegradabilidad y compostabilidad (según sea el caso) de los bioplásticos comercializados, promueven la producción y uso de materiales que pueden reintegrarse al ciclo natural sin ocasionar daño, formando parte de los principios de la economía circular y reduciendo la dependencia de plásticos tradicionales [69].

Según la directora de normalización de INTECO, la legislación del país con respecto al plástico va encaminada a la necesidad de contar con normas como la *INTE/ISO 20200:2020*, que puedan aplicarse a plásticos sostenibles para verificar de manera formal y segura las características que se le dan a estas nuevas opciones de polímeros. De esta forma, el consumidor cuenta con más información y así puede tomar decisiones más reales teniendo a disposición productos sostenibles ya certificados. Además, menciona que los laboratorios que logren acreditar la norma y ofrezcan el servicio, se verían muy beneficiados elevando la calidad de su infraestructura; estarían eliminando la barrera que existe actualmente en el país al no contar con la capacidad de poder verificar las materias en cuestión. La entrevista realizada se encuentra en el Apéndice 3.

### 4.3.2 Estudio técnico-operativo

En este análisis se fusionan aspectos técnicos y operativos necesarios para la ejecución de la metodología de la norma *INTE/ISO 20200:2020*. En la Figura 4.3 se muestra un diagrama de los principales procedimientos del método de ensayo que se llevó a cabo; de esta manera se puede detallar con mayor facilidad los requerimientos de cada etapa. Es importante mencionar que no se detallará a fondo cada proceso, pues ya están redactados en las secciones 3.1 y 3.2.

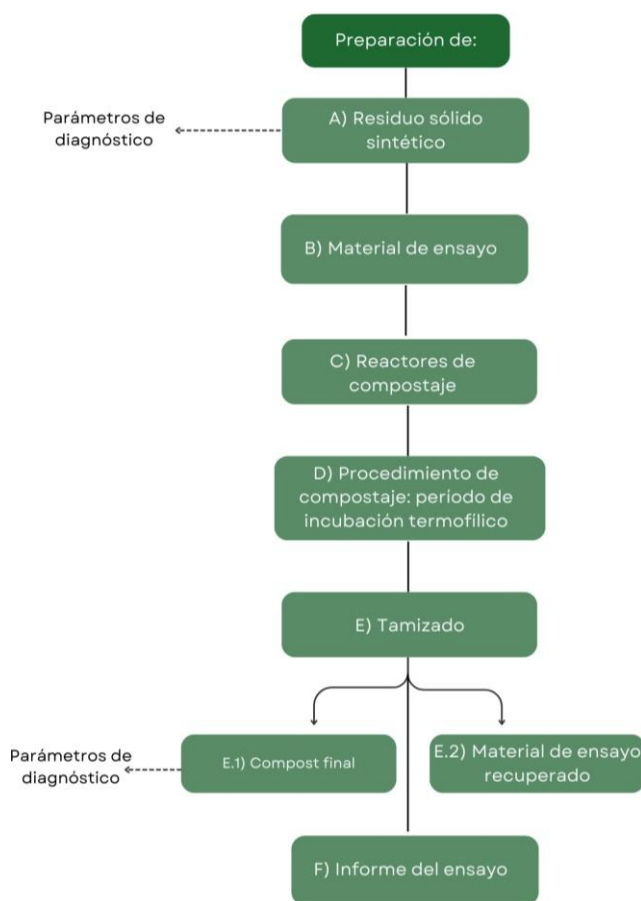


Fig. 4.3. Diagrama de los principales procedimientos del método de ensayo de la norma INTE/ISO 20200:2020.

En la Tabla IX se detallan los materiales y equipo que fueron necesarios para desarrollar el método de ensayo de la norma, y el tiempo requerido en cada etapa. En términos generales, los materiales en todos los procesos fueron de fácil acceso y en los laboratorios que se ejecutó el método en cuestión, disponían los equipos utilizados, salvo para los análisis de carbono y nitrógeno total, los cuales fueron contratados a un laboratorio externo.

**TABLA IX**  
**ASPECTOS TÉCNICOS Y OPERATIVOS DE**  
**CADA ETAPA DEL PROCEDIMIENTO**  
**DEL MÉTODO DE ENSAYO**

<b>Proceso</b>	<b>Materiales</b>	<b>Equipo</b>	<b>Tiempo (h)</b>
A) Elaboración del residuo sólido sintético	Aserrín, alimento para conejos, compost maduro, almidón de maíz, sacarosa, aceite de maíz, urea, agua destilada y 1 caja de 32L	Medidor de pH Analizador de humedad Horno de mufla Balanza granataria	14
B) Material de ensayo	Polímeros Tijeras Regla Agua destilada	Horno de secado a vacío Balanza granataria	2
C) Reactores de compostaje	Residuo sólido sintético 6 cajas de 6L Cinta Adhesiva	Balanza granataria	2
D) Período de incubación termofílico	Reactores de compostaje preparados	Horno con circulación de aire Balanza granataria	23
E) Tamizado	Tamices de 9.50mm, 4.75mm y 2.00mm.	Balanza granataria Horno de secado a vacío	13
F) Elaboración del Informe de ensayo	Información del método de ensayo aplicado	Computadora	10
<b>Total</b>			<b>64</b>

Nota: Materiales, equipo y tiempo requerido en cada proceso del método de ensayo aplicado.

Los procedimientos que tuvieron una duración más prolongada fueron la preparación del residuo sólido sintético y la puesta en marcha del procedimiento de compostaje en el período termofílico. Para este primero (A), se contaba con una sola preparación del residuo sólido sintético inicial de 6000 g, para posteriormente dividirlo en los 6 reactores, sin embargo, la balanza granataria tenía un límite de 4600 g, lo que ocasiono atrasos al tener que dividir la mezcla en dos. Por esta razón, se recomienda disponer de una balanza granataria con mayor capacidad. También, al realizar un solo RSS se obtiene una mejor integración de

todos los componentes, asegurando una mezcla similar para todos los reactores. Además, lo anterior provocó que el ajuste de agua destilada para el RSS se tuviera que realizar en cada reactor, es decir, ya una vez dividido en los seis reactores y por esto la masa inicial de cada uno fue de 1500 g aproximadamente. Se recomienda hacer el ajuste de agua del 55% de la masa seca del RSS en la mezcla inicial, antes de dividirlo en los reactores, y así cumplir con los 1000 g de RSS húmedo para cada reactor, como lo indica la norma.

El procedimiento (D) es el que presenta mayor duración porque es la operación del procedimiento de compostaje; el período termofílico transcurrió en un lapso de 45 días, donde alrededor de 23 días se tuvieron que realizar mediciones. En esta etapa, se identificó como limitante que el horno donde se encontraban los reactores estaba ubicado en un laboratorio distinto al de la balanza granataria. Todos los días de operación se deben pesar los reactores, por lo que trasladarlos de un lugar a otro se traduce a inversión de tiempo y esfuerzo por parte de los operarios; se sugiere disponer de los equipos y materiales en un solo laboratorio para agilizar y facilitar el proceso. Otro punto por tomar en cuenta durante la operación, es la precaución que se debe tener al mezclar los reactores de compostaje para evitar pérdidas de material.

En esta misma etapa (D), se utiliza un horno con circulación de aire donde su funcionamiento no se detiene y su temperatura no se puede modificar hasta finalizar el procedimiento. En este caso, toda su área interna estaba ocupada por los seis reactores y un desecador, por lo que no puede ser utilizado para ningún otro propósito. De esta manera, es necesaria la adquisición de un horno de este tipo exclusivamente para la metodología de la norma en cuestión, en caso de implementarla. Además, se considera adecuado un horno con un área y volumen interno mayor al actual, pues este solo tiene la capacidad de llevar a cabo el procedimiento para tres servicios simultáneamente. Un servicio se refiere al análisis de un tipo de material plástico, el cual se hace por triplicado (3 reactores de compostaje por cada material plástico).

Cabe rescatar que, existe la posibilidad de contaminación cruzada entre los reactores o proveniente del horno. Por ello, en caso de utilizar este equipo para fines de la norma bajo estudio, se recomienda implementar un riguroso protocolo de limpieza y elevar las medidas de precaución durante la manipulación tanto del equipo como de los reactores. Adicionalmente, se sugiere valorar la ejecución simultánea de los servicios correspondientes

solo a un mismo cliente, cuando la capacidad y demanda de los servicios lo permitan, con el objetivo de minimizar el riesgo de contaminación cruzada entre análisis.

En orden de tiempo requerido, se encuentra el tamizado (E). Con respecto al material de ensayo PLA, la recuperación de fragmentos de este en cada fase del tamizado requiere de un elevado cuidado, pues en este punto, el material se presenta muy frágil y se rompe fácilmente al tocarlo. Lo anterior solo ocurrió con el reactor 1, ya que en el reactor 2 y 3 no se encontraron fragmentos visibles de PLA. Al lavar el ME residual, se recomienda hacerlo en un recipiente que no permita el escape de agua para evitar pérdida de material. Además, este proceso se extendió porque el material de ensayo PLA era de color transparente y al final tomó el color del RSS, debido a esto, al inicio se dificultó reconocer si eran partículas de algún componente del RSS o ME.

Por otra parte, es necesario resaltar que, para este caso, la cantidad de ME que se debía secar en horno a vacío no era muy significativa, es decir, no abarcó gran volumen interno de este, por lo que no hubo problema con su uso a pesar de que estaba siendo utilizada para otras investigaciones al mismo tiempo, pues pertenece al Laboratorio de Suelos de la Escuela de Química. Sin embargo, si en futuros casos la cantidad de ME que se debe secar es significativamente mayor, se aconseja considerar la compra de un horno de secado a vacío. La bitácora de tiempo de cada actividad realizada en la investigación se encuentra en el Apéndice 4.

Un factor relevante por tomar en cuenta durante el procedimiento es la generación de olores. El proceso de compostaje naturalmente emite olores por la descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos [62]. Cuando el compostaje aerobio se maneja adecuadamente, tiene una afectación mínima en la contaminación del aire y en el desprendimiento de malos olores [70]. Sin embargo, a lo largo del procedimiento, sí hubo presencia de olores, los cuales aumentaron al pasar los días. Es por esto, que se propone una reubicación del equipo, en un sitio con suficiente ventilación y alejado de oficinas. Además, se sugiere que el espacio asignado para el horno cuente con ventana externa, de esta manera se puede considerar la obtención de un sistema de extracción de gases que se pueda complementar con una ventana.

Desde una perspectiva económica y funcional, un sistema de extracción con ducto flexible resistente al calor y filtro de carbón activado es una buena opción para solucionar la propagación de olores. Los gases serían extraídos y pasarían a

través de los filtros de carbón activado, absorbiendo los olores [36]; el ducto flexible se puede conectar a una ventilación externa y de esta forma redirigir los gases y olores generados para evitar que se propaguen en otras áreas no deseadas. No obstante, si la reubicación del equipo es exitosa, los filtros con carbón activado serían suficientes para el objetivo de la problemática en cuestión, siendo una opción económica y de fácil instalación; estos se colocarían en el exterior del horno en la salida de ventilación. Cabe enfatizar que, dependiendo de la cantidad de reactores en operación, podría aumentar la difusión de olores y en este caso, se tendría que reevaluar el sistema elegido para esto.

Sumado a las recomendaciones, si se cuenta con un horno con circulación de aire de mayor capacidad, se estima conveniente utilizar reactores de compostaje con un volumen mayor, permitiendo una mejor oxigenación del compostaje; los actuales cumplen con las especificaciones de la norma, sin embargo, el RSS abarcó casi todo el volumen de estos.

El recurso humano para ejecutar la operación del método de ensayo es mínimo, lo puede realizar una sola persona. De igual forma, esto estará sujeto a la cantidad de reactores que se deban asistir. Al implementar una norma, se debe impartir una capacitación para los posibles operarios; se recomienda capacitar a varios profesionales y así, contar con diversas personas calificadas para llevar a cabo esta labor, previendo que la cantidad de análisis sea mayor.

#### **4.3.3 Estudio ambiental**

Se realizó un balance de energía para poder estimar la energía consumida durante el método de ensayo. La Figura 4.4 muestra la distribución porcentual de la energía consumida estimada durante cada proceso aplicado en esta investigación. Se muestra que el mayor consumo energético proviene del procedimiento de compostaje en el período de incubación termofílico, casi en un 100%, seguido del proceso de secado del material de ensayo al inicio y al final, el análisis de parámetros de diagnóstico del RSS y del compost final, y por último, el registro de masas.

Los resultados son los esperados, ya que en el período de incubación termofílico se hace uso de un horno con circulación de aire, la cual permaneció encendida 24 horas al día durante 48 días en total, a una temperatura de  $(58,0 \pm 0,1)$  °C. En los demás procesos, el

equipo utilizado no presenta un consumo energético significativo. Se incluyen en el Apéndice 5 los cálculos correspondientes para esta sección.

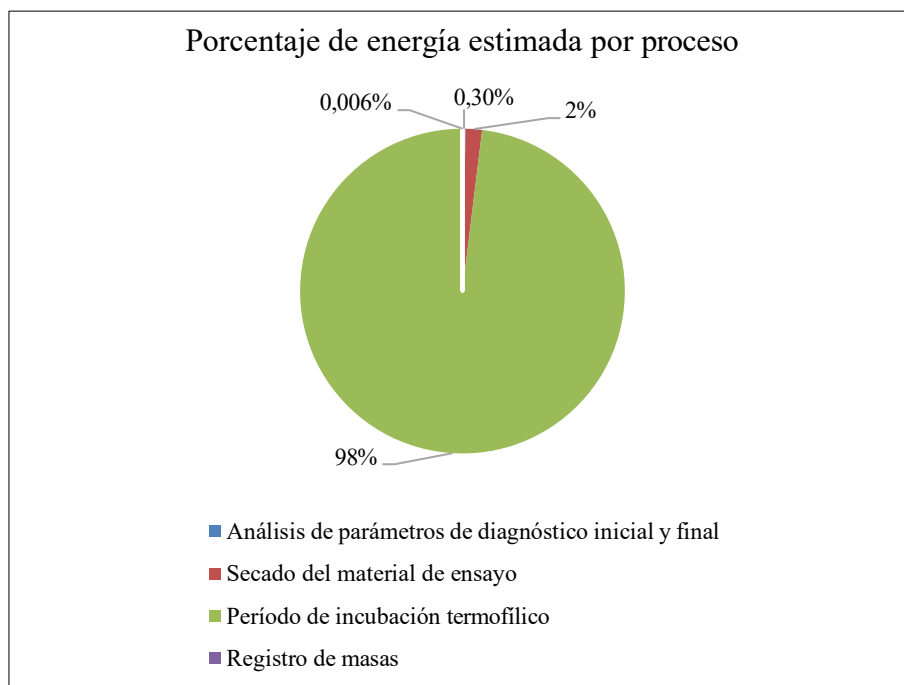


Fig. 4.4. Distribución porcentual de la energía consumida estimada por proceso.

La norma *INTE/ISO 20200:2020* menciona un tiempo mínimo y un máximo dentro del período de incubación termofílico; la selección de estos va a depender de la velocidad de degradación de los materiales plásticos a analizar. En la Tabla X se encuentra una comparación de la energía estimada por proceso durante el tiempo mínimo (45 días), el cual fue el que se aplicó en esta investigación, y del tiempo máximo (90 días), con el fin de poder brindar información con respecto al consumo energético en caso de tener que extender el proceso en análisis futuros.

La energía total consumida en 48 días fue de 3524,54 kWh y en 90 días sería de 6548,66 kWh, es decir, aumentaría en un 85,80%. Un factor importante por tomar en cuenta con relación a la norma en cuestión, es que si el polímero logra degradarse en un tiempo menor, no se puede detener el proceso hasta cumplir la duración mínima. Lo anterior podría traducirse a un aspecto no beneficioso en términos ambientales, operativos y económicos, ya que durante esos días el equipo continúa consumiendo electricidad y el personal debe seguir realizando la operación.

Para tener una idea más clara con respecto al consumo energético en el proceso de esta investigación, se puede tomar de referencia que el consumo residencial en Costa Rica por mes es de 250 kWh [71]; por lo que el consumo energético registrado equivale al consumo promedio de 9 viviendas durante el lapso de 45 días.

**TABLA X**  
**COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA ESTIMADA POR**  
**PROCESO ENTRE EL TIEMPO MÍNIMO**  
**Y TIEMPO MÁXIMO DEL PERÍODO**  
**DE INCUBACIÓN TERMOFÍLICO**

Proceso	Subproceso	Tiempo mínimo	Tiempo máximo
		(45 días)	(90 días)
Energía estimada por proceso (kWh)			
Análisis de parámetros de diagnóstico inicial y final	Análisis de pH		
	Análisis de masa seca	10,73	10,73
	Análisis de sólidos volátiles		
Preparación del material de ensayo al inicio y final	Secado del material de ensayo	57,60	57,60
Período de incubación termofílico	Proceso de compostaje	3456	6480
Registro de masas	Masa de componentes del residuo sólido sintético	0,21	0,33
	Masa de reactores		
	Masa de compost final y material de ensayo		
<b>Total</b>		<b>3524,54</b>	<b>6548,66</b>

Nota: Datos de la energía estimada por proceso entre el tiempo mínimo y tiempo máximo del período de incubación termofílico.

Otro análisis realizado para el estudio ambiental es un Inventario de Gases de Efecto Invernadero (Apéndice 6), con el fin de continuar evaluando la fuente que genera el mayor impacto ambiental en el presente proyecto. Los resultados muestran que la electricidad es la fuente principal de emisiones, con un porcentaje de aporte de CO<sub>2</sub> e del 99,52%, el porcentaje

restante se atribuye a los residuos orgánicos con un aporte de CO<sub>2</sub> e del 0,48%. Si bien los residuos orgánicos generan emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) y de óxido nitroso (NO<sub>2</sub>) durante el proceso de compostaje [60], su aporte es casi insignificante en comparación con la electricidad.

Al final del procedimiento, la cantidad total de compost de los 6 reactores fue de 8,53 kg. En este caso, se desecharon en residuos no valorizables por la presencia de hongo, sin embargo, se recomienda que este residuo sea gestionado con un gestor autorizado de residuos orgánicos para que se complete la correcta gestión y tratamiento final de estos.

Para obtener una mejor visualización de los datos presentes y que el impacto ambiental sea más comprensible en términos de actividades cotidianas, se hacen las siguientes equivalencias: los residuos orgánicos emiten en el proceso 0.001 tCO<sub>2</sub> e y la electricidad 0.310 tCO<sub>2</sub>e, los cuales equivalen aproximadamente a recorrer 4 km y 1240 km en automóvil de gasolina [72].

A pesar de que es difícil lograr optimizar los procesos con alto consumo energético, ya que esto se eleva por la cantidad de horas continuas y días que el horno con circulación de aire debe estar encendido, según la metodología de la norma *INTE/ISO 20200:2020*, se insta a evaluar la obtención de tecnologías energéticamente eficientes. Además, se hace la recomendación de aplicar dicha metodología solo para plásticos sostenibles, es decir, no para los convencionales. De esta forma, se podría evitar extender el proceso al tiempo máximo. Es relevante mencionar que solo aplicando el método experimental se va a poder confirmar el tiempo que requiera el proceso para cada material polimérico a analizar.

En términos de consumo de agua, el total fue de 18,63 L en el lapso de 45 días. Este dato no corresponde a un valor significativo, tomando en cuenta que pertenece al consumo de agua para dos análisis de materiales de ensayo distintos y en 45 días, es decir, el consumo diario en el período de tiempo total es de 0,41 L.

#### **4.3.4 Estudio económico**

Con el fin de analizar la factibilidad económica de implementar la norma *INTE/ISO 20200:2020* en el CEQIATEC, se realizan 3 escenarios detallados a continuación, cuyos costos e información asociada están referenciados al primer semestre de 2025. Se parte del

supuesto que en todos los escenarios la duración de la metodología es llevada al tiempo máximo del período de incubación termofílico, 90 días, con excepción al escenario 1.2., el cual contempla un lapso de 45 días.

Escenario 1: Análisis económico sin contemplar compra de hornos adicionales

Se asume que el horno con circulación de aire de 236 L que se tiene actualmente en el CEQIATEC, es suficiente para poder abastecer la demanda de servicios de la norma, por lo tanto, no se contemplan costos de adquisición de nuevos equipos. Con el objetivo de cuantificar el impacto económico para el laboratorio, la Tabla XI detalla el análisis de los costos para poder implementar el proyecto.

**TABLA XI**  
**COSTOS INICIALES DEL PROYECTO ASOCIADO**  
**A LA IMPLEMENTACIÓN**  
**DEL ESCENARIO 1**

<b>Costo de implementación de la norma</b>		<b>Costo total (C)</b>	
Acreditación		C 2 858 440	
Capacitación		C 190 000	
Total		C 3 048 440	
<b>Materiales y equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo individual</b>	<b>Costo total (C)</b>
Cajas plásticas de 6L	9	C 3 300	C 29 700
Caja plástica de 32 L	1	C 4 200	C 4 200
Total		C 33 900	
<b>Costos por contingencias</b>		<b>Costo total (C)</b>	
5% del proyecto		C 154 117	
Costo total inicial del proyecto		C 3 236 457	

Nota: Se muestran los datos de los costos iniciales del proyecto con relación al escenario 1.

Como se observa, el costo del proyecto se divide en costos de implementación de la norma, materiales, equipo y costos por contingencias. Las cajas plásticas utilizadas como reactores se pueden reutilizar para cada uno de los servicios, sin embargo, a pesar de que se utilizan solo 3 por servicio, se recomienda comprar 9 unidades de 6 L para tener en inventario en caso de que alguna se dañe. Es importante recalcar que la ejecución de 1 servicio se traduce al análisis de un polímero, para el cual se deben utilizar 3 réplicas (3 reactores iguales). Se decide contemplar un 5% de costos por contingencias para anticipar cualquier imprevisto.

Todo lo anterior suma un monto de ₡3 236 457 como proyección de los costos de la implementación del proyecto para el escenario 1.

Seguidamente, la Tabla XII muestra los costos operativos al ejecutar 1 servicio de la norma *INTE/ISO 20200:2020*, es decir, para 1 material de ensayo (1 polímero).

**TABLA XII**  
**COSTOS ASOCIADOS A LA OPERACIÓN**  
**DEL MÉTODO DE ENSAYO PARA UN**  
**SERVICIO DEL ESCENARIO 1.1**

<b>Recurso humano</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Duración (h)</b>	<b>Costo/hora (₡)</b>	<b>Costo total (₡)</b>
Analista de laboratorio	1	50	₡ 2 100	₡ 105 000
Regente químico	1	1	₡ 11 887	₡ 11 887
<b>Total</b>				₡ 116 887
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (g)</b>		<b>Costo total (₡)</b>	
Aserrin	1200		₡ 240	
Alimento para conejo	900		₡ 765	
Compost maduro (inóculo)	300		₡ 1000	
Almidón de maíz	300		₡ 1320	
Sacarosa	150		₡ 113	
Aceite de soya	120		₡ 105	
Urea	30		₡ 18	
<b>Total</b>			₡ 3 560	
<b>Análisis parámetros de diagnóstico</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo Total (₡)</b>	
Relación carbono total/nitrógeno total	4	₡ 9 639	₡ 38 556	
Sólidos volátiles	4	₡ 6 732	₡ 26 928	
<b>Total</b>			₡ 65 484	
<b>Total costos por servicio</b>				₡ 185 931
<b>Energía estimada mensual (kWh)</b>			<b>Costo total (₡)</b>	
2349,69			₡ 114 900	
<b>Costo Energético Total Mensual</b>				₡ 114 900
<b>Sistema de extracción de gases</b>			<b>Costo total (₡)</b>	
Filtros de carbón activado			₡ 130	
<b>Total costos fijos mensuales</b>				₡ 115 030

Nota: Se muestran los datos de los costos de operación del método bajo estudio referentes a un servicio, es decir, a un material de ensayo.

Como se muestra, los costos operativos se dividen en costos por la operación de un único servicio de la norma en cuestión y costos fijos. Estos primeros suman ₡185 931 por servicio y un total de costos fijos de ₡115 030. Cabe destacar que, por falta de información pertinente al consumo energético, como la facturación de electricidad y datos relacionados, se asumió que el laboratorio cuenta con la tarifa T-CS de la JASEC y para el cálculo del costo energético no fue posible contemplar los cargos por potencia. Dado el caso, la tarifa mensual para  $\geq 3000$  kWh es de ₡ 114 900 [71].

Una vez obtenidos estos datos, se procede a calcular los flujos de efectivo del proyecto, expuestos en la Tabla XIII. Para lograr que se obtengan ganancias suficientes y que el escenario 1 sea económicamente viable para el CEQIATEC, el precio mínimo por servicio se supone de ₡ 929 923. Los ingresos proyectados corresponden al cálculo de la multiplicación del precio de 1 servicio (₡ 929 923) por 3 servicios, ya que el horno que se tiene actualmente tiene capacidad para 3 servicios. Adicionalmente, los ingresos se colocan cada 3 meses ya que el procedimiento tiene una duración mínima de 45 días y una máxima de 90 días, por lo que se utiliza el intervalo de tiempo mayor para el análisis económico. Los flujos de efectivo mostrados fueron llevados a un mismo período en el tiempo con el fin de que el valor del dinero sea el mismo al ser comparado.

**TABLA XIII**  
**FLUJOS DE EFECTIVO DEL PROYECTO**  
**PARA EL ESCENARIO 1.1**

<b>Descripción</b>	<b>Mes 0</b>	<b>Mes 1</b>	<b>Mes 2</b>	<b>Mes 3</b>	<b>Mes 4</b>	<b>Mes 5</b>	<b>Mes 6</b>
<b>Ingresos proyectados</b>		€2 789 769,00			€2 789 769,00		
<b>Costos/Servicio</b>		-€557 794,11			-€557 794,11		
<b>Costos Fijos</b>		-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00
<b>Inversión inicial</b>	-€3 236 457						
<b>Flujo de efectivo</b>	-€3 236 457	€2 116 945	-€115 030	-€115 030	€2 116 945	-€115 030	-€115 030
<b>P/F (Presente/Futuro)</b>	100,00%	99,01%	98,03%	97,06%	96,10%	95,15%	94,20%
<b>FEN (Flujo de efectivo neto)</b>	-€3 236 457	€2 095 985	-€112 763	-€111 647	€2 034 342	-€109 447	-€108 363
<b>Suma FEN</b>	-€3 236 457	-€1 140 472	-€1 253 235	-€1 364 882	€669 460	€560 013	€451 649

Nota: Se muestran los flujos de efectivo del proyecto para la implementación de la norma en cuestión para el escenario 1.1.

Seguidamente, se realizan los cálculos asociados a los índices de bondad financiera [56] del escenario 1.1. Utilizando una TMAR del 6% se obtiene un VAN de  $\text{C}\$0$ , el cual es igual a cero por lo que existe ganancia posterior a recuperar la inversión realizada por la empresa. El periodo de recuperación de la inversión se obtiene tras el cuarto mes por lo que se corrobora la liquidez financiera de la empresa. Asimismo, la tasa interna de retorno es de 6% la cual es igual a la tasa mínima de retorno esperada por la empresa. Por lo tanto, con el precio recomendado de  $\text{C}\$929\,923$  y con este análisis económico, se concluye que el escenario 1.1 es económicamente viable para el laboratorio. Estos se muestran más adelante en la Tabla XX, en conjunto con los índices de bondad financiera de los siguientes escenarios.

Con el fin de brindar el valor de un servicio en caso de que el material plástico analizado comprenda una duración mínima de 45 días, se realizó la siguiente evaluación económica. Los costos asociados a la operación del método son los mismos presentados en la Tabla XII, únicamente, se modificó las horas de operación del analista de laboratorio a 37 horas, dando un total de  $\text{C}\$158\,631$ . El flujo de efectivo se detalla en la Tabla XIV, bajo las mismas condiciones que el anterior. Para lograr que se obtengan ganancias suficientes y que el escenario 1.2 (período de tiempo de 45 días), sea económicamente viable para el CEQIATEC, el precio mínimo por servicio se estima de  $\text{C}\$735\,651$ . Los ingresos proyectados corresponden al cálculo de la multiplicación del precio de 1 servicio ( $\text{C}\$735\,651$ ) por 2 servicios. Se hace la suposición que ingresan 2 servicios cada mes y medio.

**TABLA XIV**  
**FLUJOS DE EFECTIVO DEL PROYECTO**  
**PARA EL ESCENARIO 1.2**

<b>Descripción</b>	<b>Mes 0</b>	<b>Mes 1</b>	<b>Mes 2</b>	<b>Mes 3</b>	<b>Mes 4</b>	<b>Mes 5</b>	<b>Mes 6</b>
<b>Ingresos proyectados</b>		€1 471 302,00	€1 471 302,00		€1 471 302,00	€1 471 302,00	
<b>Costos/Servicio</b>		-€317 262,74	-€317 262,74		-€317 262,74	-€317 262,74	
<b>Costos Fijos</b>		-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00
<b>Inversión inicial</b>	-€3 236 457						
<b>Flujo de efectivo</b>	-€3 236 457	€1 039 009	€1 039 009	-€115 030	€1 039 009	€1 039 009	-€115 030
<b>P/F (Presente/Futuro)</b>	100,00%	99,01%	98,03%	97,06%	96,10%	95,15%	94,20%
<b>FEN (Flujo de efectivo neto)</b>	-€3 236 457	€1 028 722	€1 018 537	-€111 647	€998 467	€988 582	-€108 363
<b>Suma FEN</b>	-€3 236 457	-€2 207 735	-€1 189 198	-€1 300 845	-€302 378	€686 204	€577 840

Nota: Se muestran los flujos de efectivo del proyecto para la implementación de la norma en cuestión para el escenario 1.2

Con respecto a los índices de bondad financiera del escenario 1.2, utilizando una TMAR del 6% se obtiene un VAN de ¢2, el cual es mayor a cero por lo que existe ganancia posterior a recuperar la inversión realizada por la empresa. El periodo de recuperación de la inversión se obtiene tras el cuarto mes por lo que se corrobora la liquidez financiera de la empresa. La tasa interna de retorno es de 6% la cual es igual a la tasa mínima de retorno esperada por la empresa. Por lo tanto, con el precio recomendado de ¢ 735 651 y con este análisis económico, se concluye que el escenario 1.2 es económicamente viable para el CEQIATEC. Estos se observarán en la Tabla XX.

#### Escenario 2: Análisis económico contemplando la compra de un horno con circulación de aire.

En este escenario, se asume que el horno con circulación de aire de 236 L que posee el laboratorio de investigación del CEQIATEC, no tiene suficiente capacidad para ser utilizado para los servicios requeridos de la norma *INTE/ISO 20200:2020*, ya que se utiliza para otros propósitos, por lo tanto, se contemplan costos de adquisición de un nuevo equipo idéntico al que se tiene actualmente. Con el fin de cuantificar el impacto económico para el laboratorio, se realiza el análisis de los costos para poder implementar el proyecto del escenario 2, detallados en la Tabla XV.

**TABLA XV**  
**COSTOS INICIALES DEL PROYECTO ASOCIADO**  
**A LA IMPLEMENTACIÓN**  
**DEL ESCENARIO 2**

<b>Costo de implementación de la norma</b>			<b>Costo total (C)</b>
Acreditación			¢ 2 858 440
Capacitación			¢ 190 000
Total			¢ 3 048 440
<b>Materiales y equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo individual</b>	<b>Costo total (C)</b>
Horno con circulación de aire de 236 L	1	¢1 900 000	¢1 900 000
Cajas plásticas de 6L	9	¢ 3 300	¢ 29 700
Caja plástica de 32 L	1	¢ 4200	¢ 4 200
Total			¢ 1 933 900
<b>Costos por contingencias</b>			<b>Costo total (C)</b>
5% del proyecto			¢ 249 117
Costo total inicial del proyecto			¢ 5 231 457

Nota: Se presentan los datos de los costos iniciales del proyecto con relación al escenario 2.

Como se observa, el costo del proyecto contempla las mismas categorías que la Tabla XI explicada en el escenario 1. Sin embargo, se agrega el costo de adquisición de un horno con circulación de aire de 236 L, de la misma marca y modelo que el actual. Todo lo anterior suma un monto de ¢5 231 457 como proyección de los costos de la implementación del proyecto.

Los costos operativos al ejecutar 1 servicio de la norma en cuestión son exactamente los mismos que fueron detallados en la Tabla XII del escenario 1, los cuales corresponden a valor total de ¢185 931 por servicio y un total de costos fijos de ¢115 030.

Para este escenario, el precio que se recomienda es de ¢1 322 198 por servicio, ya que con este valor se obtendrán ganancias suficientes para que el escenario 2 sea económicamente viable para el laboratorio. Esto se evidenciará a continuación, en la Tabla XVI que refleja los flujos de efectivo del proyecto del escenario 2.

Los ingresos proyectados, corresponden al cálculo de la multiplicación del precio de 1 servicio (¢1 322 198) por 3 servicios, ya que el horno que se propone comprar en este

escenario es igual al que tiene actualmente el laboratorio, con capacidad para 3 servicios simultáneamente. De la misma manera que en el escenario anterior, los ingresos se colocan cada 3 meses ya que se utiliza el intervalo de tiempo mayor (90 días) para el análisis económico. Los flujos de efectivo fueron llevados a un mismo periodo en el tiempo con el fin de que el valor del dinero sea el mismo al ser comparado.

**TABLA XVI**  
**FLUJOS DE EFECTIVO DEL PROYECTO**  
**PARA EL ESCENARIO 2**

<b>Descripción</b>	<b>Mes 0</b>	<b>Mes 1</b>	<b>Mes 2</b>	<b>Mes 3</b>	<b>Mes 4</b>	<b>Mes 5</b>	<b>Mes 6</b>
<b>Ingresos proyectados</b>		€3 966 594,00			€3 966 594,00		
<b>Costos/Servicio</b>		-€557 794,11			-€557 794,11		
<b>Costos Fijos</b>		-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00	-€115 030,00
<b>Inversión inicial</b>	-€5 231 457						
<b>Flujo de efectivo</b>	-€5 231 457	€3 293 770	-€115 030	-€115 030	€3 293 770	-€115 030	-€115 030
<b>P/F (Presente/Futuro)</b>	100,00%	99,01%	98,03%	97,06%	96,10%	95,15%	94,20%
<b>FEN (Flujo de efectivo neto)</b>	-€5 231 457	€3 261 158	-€112 763	-€111 647	€3 165 248	-€109 447	-€108 363
<b>Suma FEN</b>	-€5 231 457	-€1 970 299	-€2 083 062	-€2 194 709	€970 539	€861 092	€752 728

Nota: Se presentan los flujos de efectivo del proyecto para la implementación de la norma en cuestión para el escenario 2.

En este sentido, se realizan cálculos asociados a los índices de bondad financiera del escenario 2, presentados en la Tabla XX. Utilizando una TMAR del 6% se obtiene un VAN de ¢3, el cual es mayor a cero por lo que existe ganancia posterior a recuperar la inversión realizada por el laboratorio. El periodo de recuperación de la inversión se obtiene tras el cuarto mes por lo que se corrobora la liquidez financiera de la empresa. Asimismo, la tasa interna de retorno es de 6%, siendo igual a la tasa mínima de retorno esperada por la empresa. Por lo tanto, con el precio recomendado de ¢1 322 198 y con este análisis económico, se concluye que el escenario 2 es, también, económicamente viable para el laboratorio.

### Escenario 3: Análisis económico contemplando la compra de un horno con circulación de aire de mayor capacidad

En este escenario, se asume que el horno de 236 L que tiene actualmente en el CEQIATEC, no tiene capacidad para poder ser utilizado en servicios de la norma *INTE/ISO 20200:2020* y no da abasto para la supuesta demanda requerida, ya que actualmente se utiliza para otros propósitos, por lo tanto, se contemplan costos de adquisición de un nuevo equipo con mayor capacidad.

Con el fin de cuantificar el impacto económico para el laboratorio, se realiza el análisis de los costos para la implementación del proyecto, detallados en la Tabla XVII.

**TABLA XVII**  
**COSTOS INICIALES DEL PROYECTO ASOCIADO**  
**A LA IMPLEMENTACIÓN**  
**DEL ESCENARIO 3**

<b>Costo de implementación de la norma</b>		<b>Costo total (C)</b>	
Acreditación		C 2 858 440	
Capacitación		C 190 000	
Total		C 3 048 440	
<b>Materiales y equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo individual</b>	<b>Costo total (C)</b>
Incubadora con flujo de aire de 404 L	1	C 4 900 000	C 4 900 000
Cajas plásticas de 6 L	18	C 3 300	C 59 400
Caja plástica de 32 L	1	C 4 200	C 4 200
Total		C 4 963 600	
<b>Costos por contingencias</b>		<b>Costo total (C)</b>	
5% del proyecto		C 400 602	
Costo total inicial del proyecto		C 8 412 642	

Nota: Se presentan los datos de los costos iniciales del proyecto con relación al escenario 3.

El equipo recomendado es una incubadora de 404 L, con sistema de flujo de aire, marca INCUCCELL modelo 404-ECO Line [73]. Este equipo tiene una capacidad para contener alrededor de 18 reactores de 6 L, es decir, se pueden llevar a cabo 6 servicios simultáneamente de la norma en cuestión. Además, tiene una potencia de 0,9 kW, mientras que el horno actual es de 3000 kW; esto disminuiría el impacto ambiental y se vería reflejado en la parte económica con respecto a la electricidad, pues en la tarifa T-CS de la JASEC, se cobra un monto de C38,30 por kW adicional. Otra razón sumada a la recomendación de este equipo se respalda en un estudio reciente en la Universidad de Costa Rica [5], en el cual se aplicó la metodología de la norma *UNE-EN ISO 20200:2015*, obteniéndose resultados satisfactorios; esto proporciona una referencia práctica que valida su uso para este fin.

Por consiguiente, en este escenario se agrega el costo de adquisición de dicho equipo. Todo lo anterior suma un monto de C8 412 642 como proyección de los costos de la

implementación del proyecto. Posteriormente, se calculan los costos operativos al ejecutar 1 servicio de la norma, en base al escenario 3, presentados en la Tabla XVIII.

**TABLA XVIII**  
**COSTOS ASOCIADOS A LA OPERACIÓN**  
**DEL MÉTODO DE ENSAYO PARA UN**  
**SERVICIO DEL ESCENARIO 3**

<b>Recurso humano</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Duración (h)</b>	<b>Costo/hora (₡)</b>	<b>Costo total (₡)</b>
Analista de laboratorio	1	50	₡ 2 100	₡ 105 000
Regente químico	1	1	₡ 11 887	₡ 11 887
<b>Total</b>				<b>₡ 116 887</b>
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad (g)</b>		<b>Costo total (₡)</b>	
Aserrin	1200		₡ 240	
Alimento para conejo	900		₡ 765	
Compost maduro (inóculo)	300		₡ 1000	
Almidón de maíz	300		₡ 1320	
Sacarosa	150		₡ 113	
Aceite de soya	120		₡ 105	
Urea	30		₡ 18	
<b>Total</b>			<b>₡ 3 560</b>	
<b>Análisis parámetros de diagnóstico</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo Total (₡)</b>	
Relación carbono total/nitrógeno total	4	₡ 9 639	₡ 38 556	
Sólidos volátiles	4	₡ 6 732	₡ 26 928	
<b>Total</b>			<b>₡ 65 484</b>	
<b>Total costos por servicio</b>				<b>₡ 185 931</b>
<b>Energía estimada mensual (kWh)</b>			<b>Costo total (₡)</b>	
2349,69			₡ 114 900	
<b>Costo Energético Total Mensual</b>				<b>₡ 114 900</b>

Nota: Se muestran los datos de los costos de operación del método bajo estudio referentes a un servicio, es decir, a un material de ensayo para el escenario 3.

Los costos operativos son los mismos que se detallaron en el escenario 1 y 2, la única diferencia es que en este caso no se toma en cuenta el costo del sistema de extracción de

gases ya que no se puede deducir si será necesario un sistema para el control de olores con este equipo. Todo lo anterior suma un total de ¢185 931 por servicio y un total de costos fijos de ¢114 900.

Para este escenario, el precio por servicio para que se obtengan ganancias suficientes y el escenario 3 sea económicamente viable para el CEQIATEC, es de ¢1 053 118. Esto se evidencia a continuación, donde se muestran los flujos de efectivo, en la Tabla XIX.

Los ingresos proyectados corresponden al cálculo de la multiplicación del precio de 1 servicio (¢1 053 118) por 6 servicios, ya que el equipo que se propone comprar en este escenario tiene el doble de capacidad comparado al que se tiene actualmente el laboratorio, el cual tiene capacidad para 3 servicios. Al igual que en escenario anterior, los ingresos se colocan cada 3 meses ya que se utiliza el intervalo de tiempo mayor (90 días) para el análisis económico. Los flujos de efectivo mostrados fueron llevados a un mismo periodo en el tiempo con el fin de que el valor del dinero sea el mismo al ser comparado.

**TABLA XIX**  
**FLUJOS DE EFECTIVO DEL PROYECTO**  
**PARA EL ESCENARIO 3**

<b>Descripción</b>	<b>Mes 0</b>	<b>Mes 1</b>	<b>Mes 2</b>	<b>Mes 3</b>	<b>Mes 4</b>	<b>Mes 5</b>	<b>Mes 6</b>
<b>Ingresos proyectados</b>		€6 318 708,00			€6 318 708,00		
<b>Costos/Servicio</b>		-€1 033 733,23			-€1 033 733,23		
<b>Costos energéticos fijos</b>		-€114 900,00	-€114 900,00	-€114 900,00	-€114 900,00	-€114 900,00	-€114 900,00
<b>Inversión inicial</b>	-€8 412 642						
<b>Flujo de efectivo</b>	-€8 412 642	€5 170 075	-€114 900	-€114 900	€5 170 075	-€114 900	-€114 900
<b>P/F (Presente/Futuro)</b>	100,00%	99,01%	98,03%	97,06%	96,10%	95,15%	94,20%
<b>FEN (Flujo de efectivo neto)</b>	-€8 412 642	€5 118 886	-€112 636	-€111 521	€4 968 340	-€109 323	-€108 241
<b>Suma FEN</b>	-€8 412 642	-€3 293 756	-€3 406 392	-€3 517 913	€1 450 427	€1 341 104	€1 232 863

Nota: Se presentan los flujos de efectivo del proyecto para la implementación de la norma en cuestión para el escenario 3.

Por último, en la Tabla XX se exponen los índices de bondad financiera de los escenarios detallados anteriormente. Para el escenario 3, utilizando una TMAR del 6% se obtiene un VAN de ¢7, el cual es mayor a cero por lo que existe ganancia posterior a recuperar la inversión realizada por la empresa. El periodo de recuperación de la inversión se obtiene tras el cuarto mes por lo que se corrobora la liquidez financiera de la empresa. Asimismo, la tasa interna de retorno es de 6% la cual es igual a la tasa mínima de retorno esperada por la empresa. Por lo tanto, con el precio recomendado de ¢1 053 118 y con este análisis económico, se concluye que el escenario 3 es, también, económicamente viable para el CEQIATEC.

**TABLA XX**  
**ÍNDICES DE BONDAD FINANCIERA DE TODOS**  
**LOS ESCENARIOS ANTERIORES**

	<b>Escenario 1.1</b>	<b>Escenario 1.2</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>
<b>TMAR</b>	6%	6%	6%	6%
<b>VAN (Valor Actual Neto)</b>	¢ 0	¢ 2	¢ 3	¢ 7
<b>TIR</b> <b>(Tasa Interna de Retorno)</b>	6%	6%	6%	6%
<b>Período de recuperación</b>	Mes 4	Mes 5	Mes 4	Mes 4

Nota: Se muestran los índices de bondad financiera de todos los escenarios presentados anteriormente.

A continuación, se hace una comparación del escenario 1, 2 y 3 analizados anteriormente con los detalles más relevantes de cada uno, mostrados en la Tabla XXI. No se incluye el escenario 1.2 por motivo que contempla los cálculos para el tiempo mínimo de la metodología, de forma que se desea comparar los escenarios con el mismo período temporal.

**TABLA XXI**  
**COMPARACIÓN DE LOS ASPECTOS RELEVANTES**  
**DE LOS TRES ESCENARIOS**

	<b>Escenario 1.1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>
<b>Inversión inicial</b>	€ 3 236 457	€ 5 231 457	€ 8 412 642
<b>Costo por Servicio</b>	€ 185 931	€ 185 931	€ 185 931
<b>Costos Fijos Mensuales</b>	€ 115 030	€ 115 030	€ 114 900
<b>Precio por servicio</b>	€ 929 923	€ 1 322 198	€ 1 247 648
<b>VAN</b>	€ 0	€ 3	€ 7
<b>TIR</b>	6%	6%	6%
<b>Periodo de Recuperación</b>	Mes 4	Mes 4	Mes 4

Nota: Se presentan los aspectos más relevantes de los tres escenarios analizados anteriormente.

De acuerdo con lo anterior, las tres propuestas son rentables, ya que el VAN es mayor a 0, la Tasa Interna de Retorno es igual a la esperada (6%) y la inversión se recupera en el cuarto mes. Sin embargo, se recomienda implementar el escenario 1 debido a que este contempla el precio del servicio más bajo, lo que es más atractivo para los clientes. No obstante, este escenario asume que el horno va a ser capaz de abastecer la demanda y a su vez, ser utilizado para los propósitos en cuestión. En caso de que la capacidad de este equipo no sea suficiente, se recomendaría entonces implementar el escenario 3, ya que este contempla adquirir un nuevo equipo con el doble de capacidad de la que se tiene actualmente.

## 5 CONCLUSIONES

- La norma *INTE/ISO 20200:2020* da como resultado el grado de desintegración de materiales plásticos al exponerlos en condiciones de compostaje, mas no se puede confirmar la compostabilidad o biodegradabilidad de ellos; para esto es necesario la aplicación de otras pruebas y ensayos de esta índole.
- El grado de desintegración del polímero PLA (97,32%) y su desaparición visual a partir del día 42, confirman su viabilidad de desintegración en compostaje en las condiciones establecidas en la norma *INTE/ISO 20200:2020*.
- La ausencia de desintegración del polímero POX (0%) a lo largo del ensayo indica que este material no es apto para desintegrarse en condiciones de compostaje simulada según la norma evaluada. Esto evidencia la necesidad de validar técnicamente las denominaciones como “biodegradables” otorgadas a este tipo de materiales en la industria del plástico.
- Se puede inferir que la presencia de hongo en todos los reactores de compostaje, tanto de PLA como de material de ensayo POX, ocasionó el aumento en el contenido de sólidos volátiles totales final, dando como resultado valores negativos en el cálculo de la disminución de sólidos volátiles; con excepción al reactor 1, el cual fue el único con ausencia de moho.
- La variabilidad de los resultados para las tres réplicas de PLA y POX es de 8,05% y 0%, respectivamente, posicionándose dentro de lo aceptado por la norma en análisis ( $\leq 20\%$ ).
- Los resultados del ensayo aplicado para los dos materiales poliméricos analizados (PLA y POX) satisfacen el primer criterio de validez de la norma *INTE/ISO 20200:2020*: los grados de desintegración para las tres réplicas de cada material de ensayo no difieren en más de 20%. Sin embargo, no satisfacen el segundo criterio: una disminución de sólidos volátiles  $\geq 30\%$ . Por lo que, según lo que define la norma, al cumplir solo uno y no ambos criterios, el ensayo aplicado se considera inválido.
- Factores como acumulación de humedad, insuficiente ventilación y leve control de temperatura interna de los reactores, pudieron propiciar el crecimiento excesivo de moho en los reactores. Es por esta razón que, las condiciones para obtener un

adecuado proceso de compostaje requiere un elevado control de todas las variables que pueden influir.

- El estudio de factibilidad ambiental mostró que el mayor impacto ambiental del método de ensayo se debe a la electricidad, principalmente por la energía consumida por el horno con circulación de aire.
- Todos los escenarios económicos evaluados son viables para el CEQIATEC, sin embargo, se recomienda el escenario 1 porque cuenta con el menor precio por servicio, lo cual es más atractivo para el cliente.

## 6 RECOMENDACIONES

- La norma *INTE/ISO 20200:2020* es aplicable a cualquier tipo de plástico, no obstante, se recomienda ejecutarla para plásticos compostables y biodegradables, pues polímeros convencionales extenderían la duración del proceso, lo cual se traduce a mayor inversión económica y operativa.
- Al elaborar el residuo sólido sintético, la caja utilizada de 32L para una cantidad de 6000g (6 reactores) se considera pequeña, por lo que es recomendable una caja de mayor volumen en caso de realizar una mayor cantidad de RSS.
- Para evitar una acumulación de humedad, mejorar la oxigenación de los reactores y evitar crecimiento excesivo de hongo, se recomienda utilizar cajas de volumen mayor a 6L para los reactores de compostaje.
- El control de la temperatura en el proceso de compostaje es fundamental para obtener correctas condiciones del proceso, por lo que es recomendable utilizar un termómetro para verificar la temperatura en el interior de los reactores. Además, elevar el control con respecto al resto de variables que influyen, con el fin de obtener condiciones óptimas en el proceso de compostaje.
- Para evitar contaminación cruzada, es recomendable desinfectar rigurosamente los hornos utilizados antes y después del proceso, obtener productos iniciales del RSS libres de patógenos y exponer el compost y el aserrín a temperaturas de 55 °C durante 5-15 días para reducir o eliminar el número de patógenos microbianos, así se obtiene un producto higienizado.
- Se recomienda reubicar el equipo del horno con circulación de aire que contiene los reactores de compostaje a un sitio con ventanas externas y alejado del personal que deba estar permanentemente en una oficina, para evitar incomodidad por los olores normales producidos del compostaje. Sumado a esto, la utilización de filtros de carbón activado se considera adecuado para minimizar la propagación de olores en el ambiente.
- Se recomienda llevar a cabo reactores de control, ya que permitirían establecer una comparación de las variables que influyen en el proceso de compostaje y el comportamiento de la actividad microbiana en presencia o ausencia de material polimérico. Asimismo, se podría evaluar la pérdida de material debido al compostaje

natural y la pérdida específica de los materiales plásticos analizados.

- Para evaluar específicamente la desintegración de los plásticos en distintas etapas del método de ensayo, se recomienda aplicar pruebas de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC).
- Con el fin de analizar el efecto de la desintegración de polímeros en el compost, se recomienda aplicar indicadores de calidad como contenido de humedad, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), azufre (S), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B).
- Se recomienda realizar un mapeo de empresas que ofrezcan materiales alternativos al plástico, o bien, que estén interesadas en incluirlos en su producción, con el fin de identificar el mercado potencial que requiera certificaciones de tercera parte. De esta manera, se evalúa la demanda real con mayor profundidad de estos servicios, así como la disposición de pago de los potenciales clientes.

## 7 REFERENCIAS

- [1] A. Vazquez, M. Beltrán y M. Velasco, "El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente," Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, 2016.
- [2] S. Soto, "Gestión de los residuos sólidos en Costa Rica," Programa Estado de la Nación, 2019.
- [3] Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) y Ministerio de Salud (MS), "Plan Nacional de Residuos Marinos 2021-2030," 2021.
- [4] C. Labarca, "Estudio de las condiciones para producir industrialmente envases plásticos a partir de materiales compostables," Tesis de licenciatura, Esc. Ing. Civil y Quím., Univ. de Chile, Santiago, 2012.
- [5] Y. Torrez, "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 licenciatura, Esc. Ing. de Biosist., Univ. de Costa Rica, San José, 2023.
- [6] Consejo Nacional Ambiental de Costa Rica, "Plan Nacional de Compostaje 2020-2050," 2020.
- [7] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, "*Ley para la Gestión Integral de Residuos*," Sistema Costarricense de Información Jurídica, [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68300&nValor3=83024&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68300&nValor3=83024&strTipM=TC) (Consultado: 23 set., 2023).
- [8] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, "*Ley para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente*," Sistema Costarricense de Información Jurídica, [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=90187](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=90187) (Consultado: 23 set., 2023).

- [9] J. Coreño y T. Méndez, "Relación estructura-propiedades de polímeros," Rev. Scielo, vol. 21, no. 4, feb., 2010. Consultado: 25 de agosto del 2023. [En línea]. Disponible: [www.scielo.org.mx](http://www.scielo.org.mx)
- [10] R. Geyer, J. Jambeck y K. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made", Sci. Adv., no. 3, jul, 2017. Consultado: 05 de setiembre del 2023. [En línea]. Disponible: [www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov)
- [11] A. Bisso-Andrade, "Petróleo: daño medioambiental y un peligro para la salud pública", Rev. Soc. Peru Med. Interna., vol. 35, no. 1, pp. 5-7, 2022. Consultado: 10 de setiembre del 2023. doi: 10.36393/spmi.v35i1.648. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.36393/spmi.v35i1.648>
- [12] J. Arandes, J. Bilbao y D. Valerio, "Reciclado de Residuos Plásticos", Rev. Iber. de Polím., vol. 5, no. 1, pp. 28-41, mar, 2004. Consultado: 10 de setiembre del 2023. [En línea]. Disponible: [arpet.org](http://arpet.org)
- [13] A. Rimac, "Bioplásticos," Fac. Ciencias Ambientales, Univ.Científica del Sur, Lima, Perú, 2019.
- [14] G. Soto, M. Chaves y A. Quesada, "El etiquetado de productos plásticos de origen biológico comercializados en Costa Rica: Guía Técnica," Fundación MarViva, San José, 2022.
- [15] K. Segura, "Evaluación de biopolímeros utilizados para empaque de alimentos empleados en condiciones de compostaje casero," Tesis de licenciatura, Esc. Ing. de Biosist., Univ. de Costa Rica, San José, 2023.
- [16] A. Rodríguez, "Biodegradabilidad de materiales bioplásticos," Cienc. y Tecnol. de Aliment., vol. 22, pp. 69-72, 2012. Consultado: 13 de setiembre del 2023. [En línea]. Disponible: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

[17] Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio, INTE/ISO 20200:2020, Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2020.

[18] J. López, "*Transformación de materiales termoplásticos*," 1 ed. España: IC Editorial, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.iceditorial.com/operac-de-transf-de-polimeros-termoplasticos-quit0209-e/6669-transformacion-de-materiales-termoplasticos-quit0209--9788416173181.html>

[19] J. Rámperez, "El ácido poliláctico (PLA): Un material innovador en la actualidad," Universidad de Almería, Almería, España, 2021.

[20] M. Stea, "Ácido poliláctico: estructura, propiedades, síntesis, usos," Lifeder, Ácido poliláctico: qué es, estructura, propiedades, síntesis y usos (lifeder.com) (Consultado: 16 set., 2023).

[21] A. Vector, "Polietileno (PE), polietileno, polietileno plástico, estructura química. Fórmula esquelética," Alamy, Polyethylene (PE, polythene, polyethene) plastic, chemical structure. Skeletal formula Stock Vector Image & Art - Alamy (Consultado: 16 set., 2023).

[22] A. Vector, "Tereftalato de polietileno o PET, Pete poliéster termoplástico, molécula de polímero con botella de plástico. Fórmula química estructural", Alamy, Polyethylene terephthalate or PET, PETE polyester, thermoplastic polymer molecule with plastic bottle. Structural chemical formula. Vector illustratio Stock Vector Image & Art - Alamy (Consultado: 16 set., 2023).

[23] L. Serna, A. Rodríguez y F. Albán, "Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones", Bibl. Dig. de Univ. del Valle, vol. 5, no. 1, pp. 2-3, jun., 2003, Consultado: 16 de setiembre del 2023. [En línea]. Disponible: [core.ac.uk](http://core.ac.uk)

[24] V. Vargas, "Aplicación de ácido poliláctico como empaques para ensaladas mínimamente procesadas previamente tratadas con aceites esenciales", Tesis de licenciatura, Esc. Ing. Biosist., Univ. de Costa Rica, San José, 2023.

- [25] W. Bohorquez, *"El proceso de compostaje"*, 1 ed., Bogotá, Colombia: Ediciones Unisalle, 2019.
- [26] K. Orellana, "Estudio de la degradabilidad del PCL (Policaprolactona) dosificado con la lignina extraída de la fibra de banano," Tesis de licenciatura, Carr. de Ing. Ambiental, Univ. Poli. Salesiana., Guayaquil, Ecuador, 2018.
- [27] G. Solano, D. Rojas, K. Rojas, M. Chavarría y M. Romero, "Biodegradation of plastics at home composting conditions," *Environmental Challenges*, vol. 7, -04-01, 2022.
- [28] F. Quiroz, F. Cadena, L. Sinche, I. Chango y M. Aldás, "Estudio de la degradación en polímeros oxo-biodegradables," *Revista Politécnica*, vol. 30(1), pp. 179–191, 2009.
- [29] M. Rodríguez, S. Paes, M. Días, M. Soares y M. Megumi, "Degradation of oxo-biodegradable plastic by *Pleurotus ostreatus*," National Library of Medicine, 2013.
- [30] J. Cahuana, "Comparación de condiciones para la degradabilidad de biopolímero, plásticos oxo-biodegradables y polietileno de baja densidad," Informe bachillerato, Univ. Peruana Unión, Lima, Perú, 2019.
- [31] L. Sánchez, "Estudio de la UCR revela que ciertos bioplásticos no son compostables en Costa Rica", Delfino, delfino.cr (Consultado: 23 set., 2023).
- [32] M. Rivas y R. Silva, "Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia Crassipes*)," *CIENCIA UNEMI*, vol. 13, no. 32, enero 9, pp. 87–100, en., 2020.
- [33] P. Roman, M. Martínez y A. Pandoja, "MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR", FAO, Santiago, Chile, 2013.
- [34] A. Camacho, L. Martínez, H. Ramírez, R. Valenzuela y M. Valdés, "Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos," *Terra Latinoamericana*, vol. 32, no. 4, 12, pp. 291–300.

[35] Laboratorio de Salud Ambiental, "Moho o Humedad en Mi Hogar," Departamento de Salud Pública de California, [https://www.cdph.ca.gov/Programs/CCDCPHP/DEODC/EHIB/CPE/CDPH%20Document%20Library/Mold/MMIMH\\_Spanish.pdf](https://www.cdph.ca.gov/Programs/CCDCPHP/DEODC/EHIB/CPE/CDPH%20Document%20Library/Mold/MMIMH_Spanish.pdf) (Consultado: 10 dic., 2024).

[36] "El Carbón Activado una Alternativa de Tratamiento de Residuos," Universidad Nacional de Catamarca, Argentina, 2024.

[37] PROCOMER, "Industria plástica en Costa Rica: Alternativas amigables con el ambiente y de transformación productiva," <https://sistemas.procomer.go.cr/DocsSEM/2626DC94-8DBE-4DD6-AB4B-47862FFED436.pdf> (Consultado: 10 dic., 2024).

[38] Ministerio de Salud, "Costa Rica Promueve Estrategia para ser una Zona Libre de Plástico de un solo Uso," <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/prensa/46-noticias-2017/930-costa-rica-promueve-estrategia-para-ser-una-zona-libre-de-plastico-de-un-solo-uso> (Consultado: 15 dic., 2024).

[39] E. Masís, *"Ley para combatir la contaminación por plástico y proteger el ambiente,"* Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, Departamento de servicios parlamentarios.

[40] Presidente de la república y Ministra de Salud, "Reglamento Técnico," Borrador MEIC-DCAL, [https://www.cicr.com/wp-content/uploads/2024/07/REG\\_TEC\\_BOLSAS\\_PLASTICO.pdf](https://www.cicr.com/wp-content/uploads/2024/07/REG_TEC_BOLSAS_PLASTICO.pdf) (Consultado: 08 en., 2025).

[41] Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), "Estrategia Nacional de Economía Circular," 2023.

[42] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), "Personas en Costa Rica podrán identificar plásticos renovables y compostables a través de etiqueta," <https://www.undp.org/es/costa-rica/comunicados-de-prensa/personas-en-costa-rica-podran-identificar-plasticos-renovables-y-compostables-traves-de-etiqueta> (Consultado: 03 dic., 2023).

- [43] Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), "Regula el uso, consumo y etiquetado del plástico de un solo uso," Sistema de Costarricense de Información Jurídica, [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=86907&nValor3=112990&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=86907&nValor3=112990&strTipM=TC) (Consultado: 08 en., 2025).
- [44] Ministerio de Comercio Exterior de Costa Rica, "Hoja de ruta de compromisos de Costa Rica como miembro de la OCDE", 2021.
- [45] AROPHA, "ISO 20200: Degree of Disintegration of Plastic Materials Under Composting Conditions," <https://www.aropha.com/biodegradable-testing-labs/iso-20200/> (Consultado: 03 feb., 2025).
- [46] AIMPLAS, "Desintegración," <https://www.aimplas.es/laboratorio/biodegradabilidad-y-compostabilidad/> (Consultado: 03 feb., 2025).
- [47] International Accreditation Service, "Certificate of Accreditation Intertek India Private Limited," <https://cdn-v2.iasonline.org/wp-content/uploads/2023/12/TL-1217-Cert-New.pdf?utm> (Consultado: 03 feb., 2025).
- [48] Intertek, "Biodegradability & Compostability Testing Services," Intertek Total Quality Assured, <https://www.intertek.com/biodegradability-testing/> (Consultado: 03 feb., 2025).
- [49] INTECO, "Standards," INTECO Online Browsing Platform (OBP), <https://inteco.isolutions.iso.org/obp/ui/#search> (Consultado: 15 feb., 2025).
- [50] Ente Costarricense de Acreditación (ECA), "Laboratorios de ensayo," <https://eca.or.cr/laboratorios-de-ensayo/> (Consultado: 15 feb., 2025).
- [51] Ente Costarricense de Acreditación (ECA), "Laboratorio de Análisis Ambiental–Universidad Nacional" <https://eca.or.cr/oec/laboratorio-de-analisis-ambiental-universidad-nacional/> (Consultado: 15 feb., 2025).

- [52] Ente Costarricense de Acreditación (ECA), "Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos CEQIATEC – Ente Costarricense de Acreditación," <https://eca.or.cr/oec/instituto-tecnologico-de-costa-rica-centro-de-investigacion-y-de-servicios-quimicos-y-microbiologicos-ceqiatec/> (Consultado: 15 feb., 2025).
- [53] Ente Costarricense de Acreditación (ECA), "Acreditación," <https://eca.or.cr/acreditacion/> (Consultado: 15 feb., 2025).
- [54] C. Echeverría, "Metodología para determinar la factibilidad de un proyecto," *Revista Publicando*, no. 2., pp. 1–17, 2017.
- [55] Colectivo de autores, "Análisis de la factibilidad ambiental de proyectos de desarrollo local," Plataforma Articulada para el Desarrollo Integral Territorial (PADIT), 2019.
- [56] L. Blank y A. Tarquin, "Engineering Economy," ed. 7a. ed. D.F, México: McGraw Hill, 2012.
- [57] R. Madrigal, "Técnicas de evaluación de flujos de inversión: mitos y realidades," *Revista de Ciencias Económicas*, vol. 29, no. 1, en., 2011.
- [58] I. Montero, N. García y Y. Duvergel, "Procedimiento para la estimación del gasto de electricidad en los centros de desarrollo de la facultad CITEC," *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 10, no. 4, pp. 43–53, abr. 2017.
- [59] J. Ranganathan, D. Moorcroft, J. Koch y P. Bhatia, "Protocolo de Gases de Efecto Invernadero," *World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute.*, 2005.
- [60] Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), "Factores de emisión de gases de efecto invernadero," Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024.

- [61] A. Khalil, S. Hassouna, H. Ashqar y M. Al-Absi, "Changes in physical, chemical and microbial parameters during the composting of municipal sewage sludge," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 27, pp. 2359–2369, oct. 2011.
- [62] W. Santana, "El proceso de compostaje," ed. 1ª., San José, Costa Rica: Ed. Unisalle, 2017.
- [63] C. Graham, A. Adhikari, F. Malekian, K. Fontenot, M. L. Lewis Ivey, y W. B. Richardson, "Compostaje en la granja: las mejores prácticas para garantizar la inocuidad de los alimentos en granja," LSU AgCenter, [En línea]. Disponible: <https://www.lsuagcenter.com/~media/system/1/b/6/c/1b6ce6720de9342cfb18a4c37d71430e/pub3460-span%20-%20onfarmcompostingpdf.pdf>
- [64] O. Castrillón, O. Bedoya y D. Montoya, "Efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost," [En línea]. Disponible: <https://repository.unilasallista.edu.co/server/api/core/bitstreams/8517877c-5a2f-4381-ab67-f7ec2296acd5/content>
- [65] F. Camacho, L. Uribe, Q. Newcomer, K. Masters y M. Kinyua, "Bio-optimización del compost con cultivos de microorganismos de montaña (MM) y lodos digeridos de biodigestor (LDBIO)," *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 10, no. 2, 12, pp. 330–341, 2018.
- [66] Dosmil50, "¿Quiénes Somos? ", Dosmil50, <https://dosmil50.com/quienes-somos/> (Consultado: 03 dic., 2023).
- [67] Esencial Costa Rica, "Empresa DosMil50 anuncia la apertura de nueva planta de conversión de bioplásticos en Cartago," PROCOMER, <https://procomer.com/empresa-dosmil50-anuncia-la-apertura-de-nueva-planta-de-conversion-de-bioplásticos-en-cartago/> (Consultado: 23 feb., 2025).
- [68] ACIPLAST, "Falta reglamento técnico para ley de prohibición de bolsas y botellas plásticas," ACIPLAST, <https://aciplast.org/falta-reglamento-tecnico-para-ley-de-prohibicion-de-bolsas-y-botellas-plasticas/> (Consultado: 23 feb., 2025).

[69] E. Valenzuela, "Lineamientos para el diseño e implementación de normas para prevenir la contaminación por plásticos de un solo uso con un enfoque de ciclo de vida," Fundación MarViva, 2023. [En línea]. Disponible: <https://marviva.net/wp-content/uploads/2023/03/3D24-Enfoque-ciclo-de-vida-CARTILLA-DIGITAL2.pdf>

[70] H. Alvarado, P. Escamilla, M. Estrada, F. Pérez y K. Moreno, "La composta como reductor de gases de efecto invernadero en el sector agrícola: una revisión integral," *ITEA- Información Técnica Económica Agraria*, pp. 2–18., 2023.

[71] S.A, Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), "Tarifas Vigentes," CNFL, <https://www.cnfl.go.cr/servicios/electricos/inmuebles/tramites/tarifas> (Consultado: 02 mar., 2025).

[72] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, "Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias," EPA, <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos> (Consultado: 02 mar., 2025).

[73] MMM Group, "INCUCCELL 404 - ECO line," MMM Group, <https://www.mmm-medcenter.es/incucell-109-incucell-404---ecoline91> (Consultado: 02 mar., 2025).

## **8 APÉNDICES**

**APÉNDICE 1: DATOS DE CADA REACTOR DURANTE EL CONTROL OPERATIVO DEL  
PROCEDIMIENTO DE COMPOSTAJE EN EL PERÍODO DE CONTROL TERMOFÍLICO**

Días	Fecha	Actividad	Masa bruta (g)						Agua (g)					
			R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6
0	24/09/2024	Se registra la masa inicial del reactor	1714.70	1560.58	1622.43	1662.14	1628.64	1555.26	540.59	474.62	504.59	517.71	505.09	480.56
1	25/09/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial.	1657.60	1487.44	1553.88	1599.38	1544.38	1496.86	57.69	73.54	68.98	62.88	84.50	58.65
2	26/09/2024		1652.73	1488.17	1555.93	1600.18	1530.86	1505.09	61.06	72.37	66.54	61.14	97.12	50.01
3	27/09/2024		1651.51	1488.68	1553.8	1602.07	1502.3	1499.14	63.23	71.53	68.96	60.09	126.20	56.52
4	28/09/2024	Se mezcla la materia de compostaje.	---	---	---	---	---	---	0	0	0	0	0	0
7	01/10/2024		1519.92	1291.92	1387.67	1437.47	1225.71	1342.05	194.36	268.17	234.53	224.92	402.78	213.64
8	02/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial. No se mezcla la materia de compostaje.	1661.90	1489.56	1557	1599.79	1512.14	1502.84	52.33	71.71	65.6	62.61	116.28	52.47
9	03/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.	1658.33	1496.5	1558.52	1603.47	1517.24	1497.16	56.05	64.44	64	58.16	111.09	58.17
10	04/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial.	1647.58	1490.11	1551.08	1604.87	1525.71	1495.26	67.27	70.53	71.26	57.59	102.57	60.72

		No se mezcla la materia de compostaje.												
11	05/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial.	---	---	---	---	---	---	0	0	0	0	0	0
14	08/10/2024	Se mezcla la materia de compostaje.	1490.65	1284.46	1409.20	1432.85	1292.18	1373.26	224.30	276.24	213.61	229.52	336.99	182.39
16	10/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial.	1617.73	1419.42	1499.71	1529.01	1460.24	1444.34	96.98	141.33	122.40	133.28	168.59	110.30
18	12/10/2023	Se mezcla la materia de compostaje.	---	---	---	---	---	---	0	0	0	0	0	0
21	15/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial.	1411.42	1269.94	1348.76	1356.63	1280.53	1277.22	303.09	290.00	273.18	305.89	348.28	278.05
23	17/10/2024	No se mezcla la materia de compostaje.	1608.50	1373.58	1491.71	1528.99	1492.35	1418.16	106.25	187.23	129.95	133.92	136.24	137.31
25	19/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa inicial.	---	---	---	---	---	---	0	0	0	0	0	0
28	22/10/2024	Se mezcla la materia de compostaje.	1468.71	1181.28	1305.80	1334.82	1293.86	1223.73	245.15	379.60	316.38	327.68	334.63	331.38
30	24/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.	1617.19	1368.87	1450.41	1498.45	1485.95	1390.55	0	0	0	0	0	0
34	28/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.	1410.28	1108.42	1172.71	1136.14	1181.75	1096.82	0	140.04	125.23	193.57	121.16	147.39
37	31/10/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.	1238.89	1003.65	1134.55	1114.23	1085.65	1066.35	132.04	244.69	163.96	215.60	217.34	177.23
43	06/11/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.	1162.18	832.17	879.23	1044.82	902.35	905.32	208.16	416.22	418.28	284.59	400.60	337.83
45	08/11/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.	1272.2	1094.89	1149.55	1176.71	1169.36	1135.23	99.51	153.61	148.69	153.39	133.51	108.04
48	11/11/2024	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.	1240.67	992.16	1083.36	1116.59	1094.75	1066.67	0	0	0	0	0	0

## APÉNDICE 2: ENTREVISTA DIRIGIDA AL COORDINADOR DEL CEQIATEC

### Entrevista

Las siguientes preguntas formuladas fueron parte de la investigación para complementar el estudio de factibilidad para la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020*, en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC).

1. En base a su opinión, ¿Considera que sería de beneficio para el CEQIATEC la implementación de la norma en cuestión? ¿Por qué?

---

2. ¿Han implementado una norma similar a esta en el CEQIATEC?

---

3. Cuando implementan alguna norma, ¿Requiere algún tipo de capacitación para el personal?

---

4. En caso de implementar la norma en cuestión, ¿El personal a cargo podrían ser estudiantes que realizan asistencia o debe ser personal profesional?

---

5. En relación con temas técnicos, ¿Con cuánta frecuencia se utiliza el horno con circulación de aire ubicado en el Laboratorio de Aguas Potables?

---

6. ¿El CEQIATEC cuenta con horno de sacado a vacío? De ser así, ¿Con cuánta frecuencia se utiliza?

---

---

7. En caso de ser necesario, ¿El CEQIATEC estaría dispuesto a comprar equipo para la implementación de la norma en cuestión?

---

---

8. ¿Actualmente, disponen de presupuesto límite para la adquisición de nuevas normas?

---

---

### APÉNDICE 3: ENTREVISTA DIRIGIDA A DIRECTORA DE NORMALIZACIÓN DE INTECO

#### Entrevista

El siguiente formulario forma parte del presente documento para complementar el estudio de factibilidad para la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020* y la necesidad/beneficio que implica para Costa Rica.

1. ¿Usted tiene algún conocimiento de la norma *INTE/ISO 20200:2020*?

---

---

2. ¿Considera usted que es de beneficio para Costa Rica que algún laboratorio sea acreditado con la norma en cuestión? ¿Por qué razón?

---

---

3. ¿Quiénes podrían beneficiarse con la acreditación de esta norma en algún laboratorio?

---

---

**APÉNDICE 4: BITÁCORA DE TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES  
REALIZADAS DURANTE EL MÉTODO DE ENSAYO DE LA NORMA  
INTE/ISO 20200:2020**

<b>Preparación previa</b>		<b>Fecha</b>	<b>Tiempo (h)</b>
Preparación del residuo sólido sintético		05-08-2024	4
		06-08-2024	3
Muestra para análisis de carbono-nitrógeno al CIA de la UCR, San Pedro		07-08-2024	2
Análisis de masa seca, sólidos volátiles y pH		11-09-2024	5
Preparación del material de ensayo y colocarlo en estufa a vacío		13-09-2024	2
Preparación de los 6 reactores de compostaje		16-09-2024	2
<b>Período de incubación termofílico</b>			
Día 0	Puesta en marcha del método de ensayo, pesar reactores	24-09-2024	3
Día 1	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	25-09-2024	2
Día 2	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	26-09-2024	1
Día 3	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	27-09-2024	1
Día 7	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	01-10-2024	1
Día 8	Pesar y agregar agua a los reactores	02-10-2024	1
Día 9	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	03-10-2024	1
Día 10	Pesar y agregar agua a los reactores	04-10-2024	1
Día 14	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	08-10-2024	1
Día 16	Pesar y agregar agua a los reactores	10-10-2024	1
Día 21	Pesar y agregar agua a los reactores	15-10-2024	1
Día 23	Pesar y agregar agua a los reactores	17-10-2024	1
Día 28	Pesar y agregar agua a los reactores	22-10-2024	1
Día 30	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	24-10-2024	1
Día 34	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	28-10-2024	1
Día 37	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	31-10-2024	1
Día 43	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	06-11-2024	1
Día 45	Pesar, agregar agua y mezclar reactores	08-11-2024	1
<b>Actividades posteriores</b>			
Quitar tapa de reactores y dejarlos en estufa de circulación de aire		11-11-2024	2
Proceso de tamizado		14-11-2024	3
		15-11-2024	3

Muestra para análisis de carbono-nitrógeno al CIA de la UCR, San Pedro	19-11-2024	2
Análisis de masa seca, sólidos volátiles y pH	20-11-2024	5
Elaboración del informe del ensayo	16-12-2024	10
Total de horas:		64

**APÉNDICE 5: ENERGÍA CONSUMIDA ESTIMADA DURANTE CADA PROCESO DEL MÉTODO DE ENSAYO  
DE LA NORMA INTE/ISO 20200:2020**

PROCESO	SUB-PROCESO	EQUIPO	MARCA	MODELO	POTENCIA NOMINAL EQUIPO (kW)	CANTIDAD DE EQUIPOS	HORAS DE OPERACIÓN TOTAL	ENERGÍA ESTIMADA (kWh)	ENERGÍA ESTIMADA PROCESO (kWh)	PORCENTAJE ENERGÍA ESTIMADA PROCESO (%)
<b>Análisis de parámetros de diagnóstico inicial y final</b>	Análisis de pH	Medidor de pH	Fisher Scientific	Accumet Basic	0,015	1	0,058	0,00087	10,72587	0,30%
	Análisis de masa seca	Analizador de humedad	OHAUS	MB 90	0,45	1	2,5	1,125		
	Análisis de sólidos volátiles	Horno de mufla	Fisher Scientific	14A: Isotemp Programmable Forced-Draft Furnace	2,4	1	4	9,6		
<b>Secado del material de ensayo</b>	Secado del material de ensayo	Horno de secado a vacío	Yamato	ADP200C	1,2	1	48	57,6	57,6	2%
<b>Período de incubación termofílico</b>	Proceso de compostaje	Horno con circulación de aire	Across International	FO-19240	3	1	1152	3456	3456	98%
<b>Registro de masas</b>	Masa de componentes del residuo sólido sintético	Balanza granataria	Adam Equipment	NBL-40021	0,01	1	21	0,21	0,21	0,006%
	Masa de reactores									
	Masa de compost final y material de ensayo									
								Total energía (kWh)	3524,54	100%

**APÉNDICE 6: INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LAS ACTIVIDADES DE LA NORMA  
INTE/ISO 20200:2020**

Categoría	Fuente	Dato de Actividad	unidad	Factor de emisión			Potencial calentamiento global		CO <sub>2</sub> e		t CO <sub>2</sub> e total	Aporte CO <sub>2</sub> e por fuente (%)
				(kg CH <sub>4</sub> / kg residuos)	(kg N <sub>2</sub> O / kg residuos)	(kg CO <sub>2</sub> e / kWh)	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O		
<b>Emisiones directas</b>	Residuos orgánicos	8,53	kg	0,004	0,00024		28	265	0,96	0,54	0,001	0,48%
<b>Emisiones indirectas por energía</b>	Electricidad	3524,54	kWh			0,088					0,310	99,52%
<b>Total</b>									0,96	0,54	0,311	100,00%

## 9 ANEXOS

**ANEXO 1: INFORME DE ENSAYO DE LA NORMA INTE/ISO 20200:2020**

**INFORME DEL ENSAYO**

# **INTE/ISO 20200:2020**

**Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio.**

**TEC** | Tecnológico  
de Costa Rica

**ingeniería**  
ambiental

# ÍNDICE

Sobre el informe.....	1
Material de ensayo.....	2
Residuo sintético.....	4
Reactores y tamices.....	5
Resultados.....	7
Compost (inóculo).....	13
Fórmulas utilizadas.....	14
Conclusión.....	16
Bibliografía.....	17

# Sobre el informe

El presente documento corresponde al informe del ensayo realizado a partir de la aplicación de la metodología descrita en la norma *INTE/ISO 20200:2020*. Dicha norma, solicita la creación de un informe de ensayo donde se debe incluir información correspondiente a la metodología aplicada, los materiales y equipo utilizado, así como las variaciones realizadas al método descrito. Además de los resultados obtenidos, análisis y cálculos realizados. Este documento cumple el orden descrito en el apartado 14 “Informe del ensayo” de la norma.

La información presente en este informe, es parte de la tesis de licenciatura de la estudiante Dara Mora Brenes de la carrera de ingeniería ambiental, del año 2025, la cual se titula “Estudio de factibilidad para la implementación de la norma *INTE/ISO 20200:2020: Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio en el CEQIATEC.*”

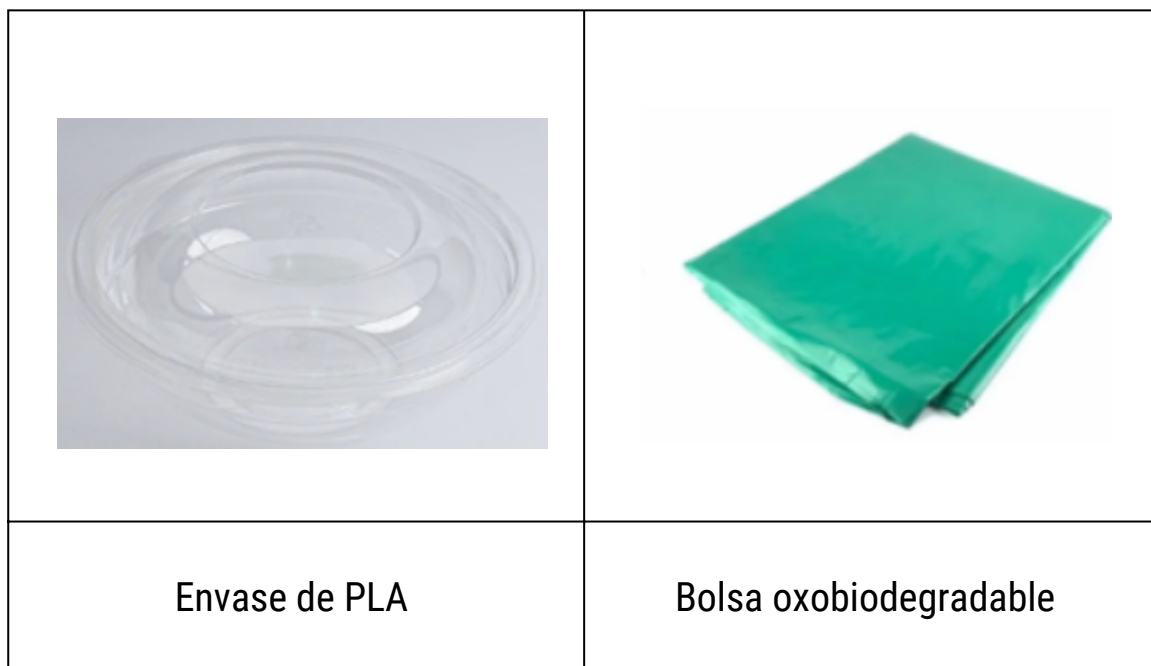
# B Material de ensayo

## Materiales de ensayo: polímeros

Los materiales plásticos utilizados fueron polímero PLA y oxobiodegradables. En el cuadro 1 se presentan algunas características de estos.

**Cuadro 1.** Características de los polímeros utilizados para la investigación.

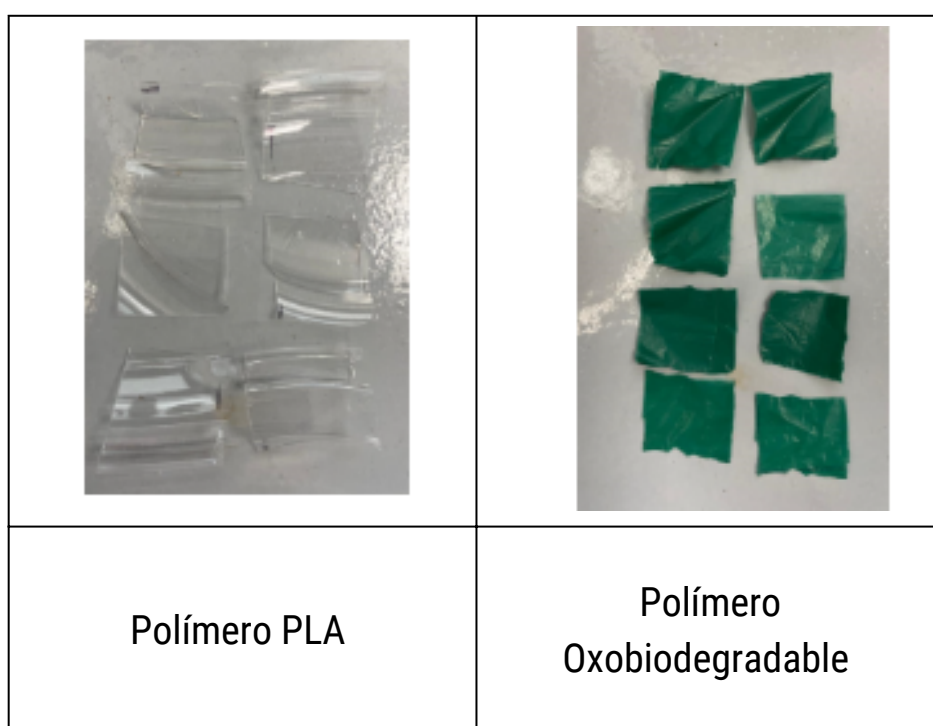
Polímero	Fuente	Color	Aplicación	Marca	Distribuidor
Ácido Poliláctico (PLA)	Almidón de maíz	Transparente	Empaque de alimentación	Vegware	Ecológica
Oxobiodegradable	Combustibles fósiles	Verde	Bolsa de basura	Zesta	Walmart



**Figura 1.** Presentación de los polímeros utilizados en la investigación: envase de PLA para almacenar alimentos de la marca Vegware y bolsas de basura marca Zesta de la línea oxobiodegradable.

## Preparación de los materiales de ensayo (polímeros)

Los materiales de ensayo (ME) se cortaron manualmente en fragmentos de 2,5 cm x 2,5 cm, ya que así lo menciona la norma para plásticos con un espesor menor a 0,5 cm. Estos se colocaron en una estufa a vacío marca Yamato modelo Vacuum Drying Oven, a  $(40 \pm 2)$  °C por 24 h. Seguidamente, se introdujeron en agua destilada por 30 s y finalmente, se mezclaron con el RSS en los reactores de compostaje.



**Figura 2.** Polímeros PLA y oxobiodegradables en fragmentos de 2,5 cm x 2,5 cm, utilizados en el análisis del proceso de compostaje.



# Residuo sintético

## Residuo sólido sintético

La matriz sólida está conformada por un residuo sólido sintético (RSS) inoculada con compost maduro. El cuadro 2 especifica el porcentaje de composición del RSS y las cantidades utilizadas de cada componente. La masa seca de cada uno se calculó multiplicando el porcentaje de cada componente por el total de la masa seca de todo el RSS. El alimento para conejo es de la marca Rabbit Plus y el porcentaje de algunos compuestos es el siguiente: 16% proteína cruda, 4% grasa cruda, 15% fibra, 1% calcio, 1.5% fósforo, 0.40% sal y 12% humedad. El aserrín es de madera no tratada y se obtuvo del Depósito de Maderas Sánchez. El compost utilizado es de residuos orgánicos domésticos, con un tiempo de maduración de 3 meses. Para el almidón de maíz se utilizó maicena (fécula de maíz), para la sacarosa, azúcar blanca regular y el aceite fue de soya. Estos últimos se compraron en el supermercado Walmart. El fertilizante urea se obtuvo de Agro Ujarrás S.A. e prepararon 6000 g de RSS.

**Cuadro 2.** Composición del residuo sólido sintético para elaborar 6000g

Componente	Porcentaje de masa seca	Masa seca (g)
Aserrín	40%	2400,31
Alimento para conejo	30%	1800,14
Compost maduro	10%	600,12
Almidón de maíz	10%	600,13
Sacarosa	5%	300,63
Aceite de soya	4%	240,39
Urea	1%	60,07
Total	100%	6001,79

El cuadro 3 corresponde a parámetros de diagnóstico de una muestra del RSS inicial. La masa seca (MS) se expresa como porcentaje de la masa total de la muestra y el contenido en sólidos volátiles (SV) se expresa como porcentaje de la MS de la muestra.

**Cuadro 3.** Parámetros de diagnóstico iniciales del residuo sólido sintético.

<b>*Relación C/N</b>	<b>Masa seca (%)</b>	<b>Contenido en sólidos volátiles (%)</b>	<b>pH</b>
19,2	14,55	17,34	5,99

\*Este análisis se realizó en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica

## **D** Reactores y tamices

### **Reactores de compostaje**

Se prepararon 6000 g de RSS, en un recipiente con capacidad de 32 L, con dimensiones 47 cm x 34 cm x 25 cm. La mezcla del RSS se dividió en 6 cajas de plástico polipropileno de 5 L, con medidas de 22 cm x 14 cm x 16 cm (largo, ancho y alto), los cuales llamaremos reactores de compostaje, ya que son los que se utilizarán para el proceso de compostaje; cada uno contenía 1000g de la mezcla. Para facilitar un intercambio de gases, se realizó un orificio de 5mm de diámetro en los lados de 14 cm, a 13 cm del fondo. Se añadió a cada reactor, 550g de agua destilada aproximadamente, para ajustar el contenido final de agua al 55%. A cada reactor se les agregó 5g de material de ensayo, los cuales se mezclaron con el RSS. Los reactoes 1, 2 y 3 (R1, R2, R3) contienen plástico PLA y los reactoes 4, 5 y 6 (R4, R5, R6) contienen plástico oxobiodegradable.



**Figura 3.** Recipientes utilizados para la elaboración de 6000 g de RSS (a) y para los reactores de compostaje requeridos en el procedimiento de compostaje de polímeros (b).

### Tamices normalizados

Para el proceso de tamizado, se utilizaron tamices normalizados de 9,50 mm, 4,75 mm y 2,00 mm, respectivamente, obtenidos del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA).



**Figura 4.** Tamiz normalizado de 9,50mm.



**Figura 5.** Tamiz normalizado de 4,75mm.



**Figura 6.** Tamiz normalizado de 9,50mm.

# Resultados

**E****Cuadro 4.** Datos de cada reactor.

<b>Reactores</b>	<b>Masa del RSS introducido (g)</b>	<b>Masa total de mezcla (RSS y ME) (g)</b>	<b>Masa bruta inicial del reactor (g)</b>	<b>Desintegración del ME (%)</b>
<b>R1</b>	976,10	981,44	1183,39	78,46
<b>R2</b>	867,39	872,46	1074,41	100
<b>R3</b>	917,39	922,47	1124,42	100
<b>R4</b>	944,02	949,02	1150,97	0
<b>R5</b>	923,00	928,00	933,00	0
<b>R6</b>	874,33	879,33	884,33	0

\*Nota: La masa de las cajas utilizadas para los reactores de compostaje es de 201,95 g.

**F****Cuadro 5.** Características del compost de cada reactor después del tamizado.

<b>Reactores</b>	<b>Masa total (g)</b>	<b>Masa seca (%)</b>	<b>Contenido en SV (%)</b>	<b>Relación C/N</b>	<b>pH</b>
<b>R1</b>	779,73	10,84	31,82	22,00	4,78
<b>R2</b>	636,12	28,08	70,18	-	7,81
<b>R3</b>	712,00	26,83	50,91	-	7,72
<b>R4</b>	735,56	34,48	78,57	16,31	8,13
<b>R5</b>	691,32	38,92	81,01	-	7,61
<b>R6</b>	655,29	37,68	80,77	-	7,94

\*Nota: El análisis de la relación carbono-nitrogeno (C/N) se realizó sólo para los reactores 1 y 4, cada uno en representación del polímero PLA y oxobiodegradables, respectivamente. Lo anterior se debe a la falta de necesidad de invertir en este análisis para los 6 reactores, ya que no es esencial para el objetivo del presente trabajo.



**Cuadro 6.** Disminución del contenido total de los sólidos volátiles.

Reactores	Inicial			Final			R (%)
	Masa inicial de RSS (g)	Masa seca inicial de RSS (%)	Sólidos Volátiles de RSS inicial (%)	Masa final del compost (g)	Masa seca final del compost (%)	Sólidos Volátiles del compost (%)	
<b>R1</b>	1512,75	14,55	55,93	779,73	10,84	31,82	78,16
<b>R2</b>	1358,63	14,55	55,93	636,12	28,08	70,18	-13,34
<b>R3</b>	1420,48	14,55	55,93	712,00	26,83	50,91	15,89
<b>R4</b>	1460,19	14,55	55,93	735,56	34,48	78,57	-67,68
<b>R5</b>	1426,69	14,55	55,93	691,32	38,92	81,01	-87,68
<b>R6</b>	1353,31	14,55	55,93	655,29	37,68	80,77	-81,05

**Cuadro 7.** Procedimiento de compostaje para el período de incubación termofílico.

		Masa bruta (g)					
Fecha	Actividad	R1	R2	R3	R4	R5	R6
24/09/2024	Se registra la masa inicial del reactor.	1714,70	1560,58	1622,43	1662,14	1628,64	1555,26
25/09/2024	Se pesó el reactor, se añadió agua para restituir la masa inicial y se mezcló la materia de compostaje.	1657,60	1487,44	1553,88	1599,38	1544,38	1496,86
26/09/2024		1652,73	1488,17	1555,93	1600,18	1530,86	1505,09
27/09/2024		1651,51	1488,68	1553,8	1602,07	1502,3	1499,14
28/09/2024		---	---	---	---	---	---
01/10/2024		1519,92	1291,92	1387,67	1437,47	1225,71	1342,05
02/10/2024	Se pesó el reactor y se añadió agua para restituir la masa inicial.	1661,90	1489,56	1557	1599,79	1512,14	1502,84
03/10/2024	Se pesó el reactor, se añadió agua para restituir la masa inicial y se mezcló la materia de compostaje.	1658,33	1496,5	1558,52	1603,47	1517,24	1497,16
04/10/2024	Se pesó el reactor y se añadió agua para restituir la masa inicial.	1647,58	1490,11	1551,08	1604,87	1525,71	1495,26
05/10/2024	Se pesó el reactor, se añadió agua para restituir la masa inicial y se mezcló la materia de compostaje.	---	---	---	---	---	---
08/10/2024		1490,65	1284,46	1409,20	1432,85	1292,18	1373,26
10/10/2024	Se pesó el reactor y se añadió agua para restituir la masa inicial.	1617,73	1419,42	1499,71	1529,01	1460,24	1444,34
12/10/2023		---	---	---	---	---	---
15/10/2024		1411,42	1269,94	1348,76	1356,63	1280,53	1277,22
17/10/2024		1608,50	1373,58	1491,71	1528,99	1492,35	1418,16
19/10/2024		---	---	---	---	---	---
22/10/2024		1468,71	1181,28	1305,80	1334,82	1293,86	1223,73
24/10/2024		1617,19	1368,87	1450,41	1498,45	1485,95	1390,55
28/10/2024	Se pesó el reactor, se añadió agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial y se mezcló la materia de compostaje.	1410,28	1108,42	1172,71	1136,14	1181,75	1096,82
31/10/2024		1238,89	1003,65	1134,55	1114,23	1085,65	1066,35
06/11/2024		1162,18	832,17	879,23	1044,82	902,35	905,32
08/11/2024		1272,2	1094,89	1149,55	1176,71	1169,36	1135,23
11/11/2024		1240,67	992,16	1083,36	1116,59	1094,75	1066,67

\*Nota: Los días que no aparece reporte del dato es porque no se realizó la operación, ya que eran días de fin de semana y el laboratorio permanece cerrado.









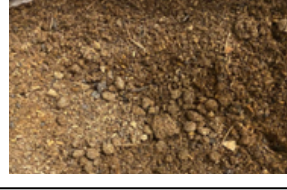
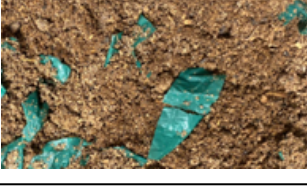

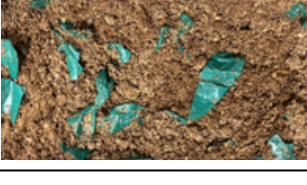

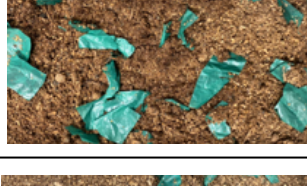


**Cuadro 8.** Agua añadida en el procedimiento de compostaje para el período de incubación termofílico.

Fecha	Agua (g)					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
24/09/2024	540,59	474,62	504,59	517,71	505,09	480,56
25/09/2024	57,69	73,54	68,98	62,88	84,50	58,65
26/09/2024	61,06	72,37	66,54	61,14	97,12	50,01
27/09/2024	63,23	71,53	68,96	60,09	126,20	56,52
28/09/2024	-	-	-	-	-	-
01/10/2024	194,36	268,17	234,53	224,92	402,78	213,64
02/10/2024	52,33	71,71	65,6	62,61	116,28	52,47
03/10/2024	56,05	64,44	64	58,16	111,09	58,17
04/10/2024	67,27	70,53	71,26	57,59	102,57	60,72
05/10/2024	-	-	-	-	-	-
08/10/2024	224,30	276,24	213,61	229,52	336,99	182,39
10/10/2024	96,98	141,33	122,40	133,28	168,59	110,30
12/10/2023	-	-	-	-	-	-
15/10/2024	303,09	290,00	273,18	305,89	348,28	278,05
17/10/2024	106,25	187,23	129,95	133,92	136,24	137,31
19/10/2024	-	-	-	-	-	-
22/10/2024	245,15	379,60	316,38	327,68	334,63	331,38
24/10/2024	0	0	0	0	0	0
28/10/2024	0	140,04	125,23	193,57	121,16	147,39
31/10/2024	132,04	244,69	163,96	215,60	217,34	177,23
06/11/2024	208,16	416,22	418,28	284,59	400,60	337,83
08/11/2024	99,51	153,61	148,69	153,39	133,51	108,04

\*Nota: Los días que no aparece reporte del dato es porque no se realizó la operación, ya que eran días de fin de semana y el laboratorio permanece cerrado.



**Cuadro 9.** Aspecto visual y olor de los reactores durante las 7 semanas del proceso de compostaje.

Semanas	Aspecto visual		Olor
	Reactores con PLA	Reactores con oxobiodegradable	
1			Ácido
2			Amoniacal
3			Olor a tierra: R1, R2, R3, R4 y R6: Olor a moho: R5
4			Olor a tierra: R1, R2, R3, R4 Olor a moho: R5 y R6
5			Olor a tierra: R1, R3 y R4 Olor a moho: R2, R5 y R6
6			Olor a tierra: R1 Olor a moho: R2, R3, R4, R5 y R6
7			Olor a tierra: R1 Olor a moho: R2, R3, R4, R5 y R6

# I

**Cuadro 10.** Grado de desintegración de los polímeros de cada reactor de compostaje.

Reactores	Masa inicial del ME (g)	Masa residual del ME recuperado (g)	Grado de desintegración (%)	Promedio del grado de desintegración (%)
R1	5,34	0,43	91,95	97,32
R2	5,07	0	100	
R3	5,08	0	100	
R4	5,00	5,01	0	0
R5	5,00	5,04	-1	
R6	5,00	5,03	-1	

# J Compost (inóculo)

El compost utilizado como inóculo a la matriz sólida del residuo sólido sintético, proviene de residuos orgánicos domésticos, tiene un tiempo de maduración de 3 meses. Se recogió en mayo del 2024 y se almacenó en un saco transpirable hasta el día de su uso. Su aspecto es de textura es uniforme y su olor es a tierra.

\*Nota: Se recomienda analizar la masa seca total, el contenido en sólidos volátiles y el pH del compost a utilizar como inóculo.

# Fórmulas utilizadas

## Masa seca y sólidos volátiles

La masa seca se expresa como porcentaje de la masa total de la muestra y el contenido en sólidos volátiles como porcentaje de la MS de la muestra, por lo que se hizo uso de la Ecuación 1 y Ecuación 2, respectivamente.

$$\%M_s = \frac{M_S}{M_H} \times 100 \quad (1)$$

$$\%SV = \frac{M_R}{M_S} \times 100 \quad (2)$$

Donde,

MS: Masa seca de la muestra (g)

MH: Masa húmeda de la muestra (g)

MR: Masa remanente de la muestra después de la calcinación (g)

## Grado de desintegración

El grado de desintegración se expresa en porcentaje mediante la Ecuación 3 y se calcula para cada reactor, independientemente.

$$D = \frac{m_i - m_r}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

Donde,

$m_i$ : masa seca inicial del material de ensayo (g).

$m_r$ : masa seca del material de ensayo residual recuperado del tamizado (g).

## Disminución en contenido de los sólidos volátiles

Como parte de la validez del ensayo, se debe calcular la disminución en contenido de los sólidos volátiles en los reactores, mediante la Ecuación 4.

$$R = \frac{[m_i \times (DM)_i \times (VS)_i] - [m_f \times (DM)_f \times (VS)_f]}{[m_i \times (DM)_i \times (VS)_i]} \times 100 \quad (4)$$

Donde,

$m_i$ : masa inicial del residuo sintético húmedo introducido en el reactor.

$(DM)_i$ : porcentaje de masa seca inicial del residuo sintético expresada en decimales.

$(VS)_i$ : porcentaje del contenido inicial en sólidos volátiles del residuo sintético, expresado decimales.

$m_f$ : masa final del compost

$(DM)_f$ : porcentaje de masa seca final del compost, expresada en decimales.

$(VS)_f$ : porcentaje del contenido final en sólidos volátiles del compost, expresado en decimales.

# Conclusión

Los resultados del ensayo aplicado para los dos materiales poliméricos analizados (PLA y POX) satisfacen el primer criterio de validez de la norma INTE/ISO 20200:2020: los grados de desintegración para las tres réplicas de cada material de ensayo no difieren en más de 20%. Sin embargo, no satisfacen el segundo criterio: una disminución de sólidos volátiles  $\geq 30\%$ . Por lo que, según lo que define la norma, al cumplir solo uno y no ambos criterios, el ensayo aplicado se considera inválido.

# **A** Bibliografía

[1] Determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions in a laboratory-scale test, ISO 20200:2015 - Plastics.