



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Agroindustrial

“EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD EN BIOPLÁSTICOS DE ALMIDÓN DE OCA (*OXALIS TUBEROSA*) MEDIANTE IMÁGENES DIGITALES”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Agroindustrial

Autora:

Gianella Lilibeth Chavez Segura

Asesor:

Dr. Ricardo David Vejarano Mantilla

Trujillo - Perú

2021

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Ricardo David Vejarano Mantilla, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis de la estudiante:

- Chavez Segura Gianella Lilibeth

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: “Evaluación de la biodegradabilidad en bioplásticos de almidón de oca (*Oxalis tuberosa*) mediante imágenes digitales” para aspirar al título profesional de: Ingeniera Agroindustrial por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** al o a los interesados para su presentación.

Ricardo David Vejarano Mantilla
Asesor

ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

Los miembros del jurado evaluador asignados han procedido a realizar la evaluación de la tesis de la estudiante: Gianella Lilibeth Chavez Segura para aspirar al título profesional con la tesis denominada: "Evaluación de la biodegradabilidad en bioplásticos de almidón de oca (*Oxalis tuberosa*) mediante imágenes digitales"

Luego de la revisión del trabajo, en forma y contenido, los miembros del jurado concuerdan:

Aprobación por unanimidad

Aprobación por mayoría

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Firman en señal de conformidad:

Ing./Lic./Dr./Mg. Nombre y Apellidos
Jurado
Presidente

Ing./Lic./Dr./Mg. Nombre y Apellidos
Jurado

Ing./Lic./Dr./Mg. Nombre y Apellidos
Jurado

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico en primer lugar a Dios, por ser el que guía y cuida mi camino, a mis padres y mi hermana por ser mi fuente de inspiración y superación constante.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) que financió mi carrera profesional permitiéndome alcanzar mi mayor anhelo. A su vez, hago extensivo mi agradecimiento a mi asesor de tesis y mis docentes de la Universidad Privada del Norte, por brindarme sus conocimientos durante el desarrollo de mi formación profesional.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS.....	2
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ECUACIONES	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	17
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES.....	30
REFERENCIAS	31

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 Modelos matemáticos para la pérdida de masa mediante el software Datafit (X:día)	
.....	23
TABLA 2 Modelos matemáticos para la desintegrabilidad visual mediante el software Datafit (X:día).....	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de elaboración de los bioplásticos a base de almidón de oca.	19
Figura 2. Vista de (a) conjunto del sistema para la toma de imágenes con el smartphone, y (b) interior de la caja para la adquisición de las imágenes.	20
Figura 3. Esquema del proceso de la adquisición y procesamiento de las imágenes de las muestras de bioplástico.....	22
Figura 4. Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los bioplásticos a base de almidón de oca. Modelo: $[Y = 132.01 * X / (46.91 + X)]$, $R^2 = 0.8774$	25
Figure 5. Evolución del porcentaje de desintegrabilidad de los bioplásticos a base de almidón de oca. Modelo: $[Y = 20.74 + 5.56 * X^{0.5} + (-20.70) * \exp(-X)]$, $R^2 = 0.7489$	26
Figura 6. Seguimiento del proceso de desintegración de las muestras de bioplástico a base de almidón de oca durante los 89 días de compostaje, mediante análisis de imágenes con el software ImageJ.....	28
Figura 7. Relación entre porcentaje de pérdida de masa y el porcentaje de desintegrabilidad en las muestras.....	29

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1).....	19
Ecuación (2).....	21

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la biodegradabilidad de bioplásticos a base almidón de oca (*Oxalis tuberosa*) tomando como referencia la Norma UNE-EN 13432:2001 y mediante la aplicación de análisis de imágenes usando el software libre Image J. Las muestras fueron sometidas a compostaje, evaluando la pérdida de masa de las muestras mediante el método gravimétrico y su desintegrabilidad mediante el análisis de las imágenes. Los resultados muestran una pérdida de masa del 90% en 101 días de compostaje, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.8774. Mientras que se alcanzó el 74% de desintegrabilidad al día 89, con un R^2 de 0.7489. Los resultados obtenidos destacan el potencial de aplicar el análisis de imágenes como método no invasivo, económico y de fácil manejo para predecir la biodegradabilidad en bioplásticos a base de almidón.

Palabras clave: Bioplásticos, biodegradabilidad, desintegrabilidad, análisis de imágenes.

ABSTRACT

The aim of the study was to evaluate the biodegradability of bioplastics based on oca (*Oxalis tuberosa*) starch using as reference the UNE-EN 13432:2001 Standard as well as the application of digital imaging by using the free software ImageJ. The samples were subjected to composting conditions, evaluating the weight loss at different times by the gravimetric method and their disintegrability by imaging analysis. The results show a weight loss of 90% in 101 days of composting, with a coefficient of determination R^2 of 0.8774. While a 74% of disintegrability was reached at day 89, with a R^2 of 0.7489. The results highlight the potential of applying the imaging analysis as a non-invasive, inexpensive, and easy-to-use method to predict the biodegradability in starch-based bioplastics.

Keywords: Bioplastics, biodegradability, disintegrability, imaging analysis.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, una de las principales preocupaciones que afronta la sociedad es la contaminación ambiental, que junto al desarrollo industrial vienen generando un considerable incremento en la generación de residuos. Se estima que en el mundo se producen anualmente hasta 10000 millones de toneladas de residuos, los cuales comprenden residuos orgánicos e inorgánicos, siendo los plásticos uno de los grupos más predominantes, un tercio de los cuales se estima que son generados directamente a partir de su uso como empaques [1,2].

Los plásticos son polímeros sintéticos derivados del petróleo y entre sus características destaca su bajo peso molecular y alta resistencia mecánica, lo que les permite una amplia diversidad de aplicaciones en hogares, agricultura, en diversas industrias, etc., logrando reemplazar a otros materiales como los metales y el vidrio [3]. Sin embargo, una inadecuada gestión para la disposición de estos materiales tras su uso ha generado su esparcimiento y acumulación a lo largo de ciudades, zonas rurales, canales de riego, ríos, lagos y océanos. Su persistencia se debe a su bajo nivel de degradabilidad, causando deterioros del paisaje [4], obstrucción en el suelo y consiguiente disminución de su capacidad para el cultivo, además de constituir una carga significativa para los ecosistemas afectados [5].

Diversos estudios han confirmado que cerca de 10 millones de toneladas de plástico que no se reciclan acaban en el mar, afectando la vida marina por sus efectos tóxicos, mutagénicos, saprogénicos, entre otros. Evidencia de este fenómeno es la actual existencia de las denominadas “islas plásticas”, conformadas en su mayoría por residuos plásticos, donde el 80% proviene de las actividades humanas, mientras que el 20% proviene del sector marino [6]. Una de estas islas, es conocida como “El gran parche de basura del Pacífico” (GPGP), formada en aguas subtropicales entre California y Hawai [7], en la cual se estiman

hasta 79 mil toneladas de plástico flotando dentro de un área de 1.6 millones de km². Esta isla ha crecido considerablemente y está constituida por redes de pesca en un 46%, más de las tres cuartas partes por plásticos de 5 cm y un 8% de micro plásticos. Por otro lado, en el ámbito de Latinoamérica, se estima la generación de 541 000 toneladas de basura al día, equivalente al 10% de la basura producida a nivel mundial, y aproximadamente la tercera parte de estos residuos son arrojados en basurales y vertederos donde no se garantiza una adecuada disposición [8].

Frente a la problemática ambiental generada por los plásticos derivados del petróleo, a nivel mundial se está propiciando el desarrollo de materiales alternativos a partir de materias primas degradables [1], por ejemplo, a base de biopolímeros. Como parte de esta estrategia mundial y tomando como horizonte el año 2025, 250 organizaciones firmaron un compromiso global para erradicar desde su origen la contaminación causada por los plásticos derivados del petróleo, a fin de garantizar que el 100% del plástico fabricado para diferentes usos, se pueda reutilizar, reciclar o compostar de forma fácil y segura [2].

A. Los bioplásticos como materiales alternativos

Los biopolímeros son materiales obtenidos de fuentes renovables, mayoritariamente de origen vegetal, siendo los más usuales el almidón y la celulosa [9]. También pueden provenir de monómeros derivados de aceites vegetales y ácido láctico, o a partir del metabolismo microbiano, como el polihidroxialcanoato (PHA) [10].

También existen materiales que son sintetizados a partir de la mezcla de biopolímeros con polímeros sintéticos, los cuales presentan propiedades físico-mecánicas intermedias en función de su composición [11], costos razonables y apariencia semejante a los plásticos convencionales, creando así un material versátil [12], atractivo para la industria y

ambientalmente amigable [13]. Además, estos materiales se caracterizan por su degradabilidad, es decir, se descomponen en un periodo corto de tiempo, bajo la acción de microorganismos, hasta desaparecer visiblemente [14], lo que le permite completar su ciclo de vida.

Respecto a la fuente de estos biopolímeros, la mayoría de los estudios se han realizado en almidones extraídos de papa, yuca o camote [28]. No obstante, estos tubérculos son consumidos de manera masiva en diferentes países, de modo que su utilización como fuente de materias primas alternativas para la elaboración de bioplásticos puede poner en peligro su disponibilidad como fuente de alimentos. En tal sentido, el presente trabajo propone aprovechar el almidón extraído de oca, un tubérculo nativo de los andes peruanos, cuyo consumo mayoritariamente se limita a zonas cercanas de las áreas de producción, es decir, no es de consumo masivo, por lo que no pone en riesgo su disponibilidad como alimento, por el contrario, su uso contribuiría a darle un mayor valor agregado [28,29].

B. Evaluación de la biodegradabilidad en plásticos

La evaluación de la biodegradabilidad de materiales plásticos se encuentra contemplada en normas técnicas derivadas de las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) y/o normas ISO (International Organization for Standardization) [15], y de certificación que regulan y estandarizan criterios, evalúan y miden la velocidad de los procesos de degradación [16].

Los métodos para evaluar la biodegradabilidad de los plásticos se pueden clasificar según el medio utilizado para disponer la muestra. Las normas ISO 14851, ISO 14852 e ISO 14853 se desarrollan en medio acuoso y miden la demanda de oxígeno mediante un respirómetro cerrado, medición de dióxido de carbono generado y producción de biogás, respectivamente [17]. Por su parte, las normas ISO 14855-1 e ISO 14855-2 trabajan en condiciones de

compostaje controlado midiendo el dióxido de carbono generado por el método general y por método gravimétrico, respectivamente [18]. Mientras que entre las normas que consideran el compostaje se encuentra la ISO 16929, que determina el grado de desintegración de plásticos bajo condiciones definidas de compostaje a escala piloto, la norma ISO 20200, que considera condiciones simuladas de compostaje a escala laboratorio [17], la norma UNE-EN 13432, que establece el programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final de plásticos para envases y embalajes, y la norma UNE-EN 14995 para plásticos no envases [4].

Si bien los métodos aplicados presentan una serie de ventajas, la evaluación de la biodegradabilidad mediante la determinación del CO₂ generado puede presentar algunos inconvenientes, como la necesidad de contar con un adecuado sistema que evite la pérdida del CO₂, y así lograr una adecuada cuantificación de este gas, y, por tanto, una estimación precisa de la degradabilidad mediante pérdida de masa. Otro inconveniente está relacionado con los altos costos que implica el uso de técnicas como la cromatografía de gases para cuantificar el CO₂ generado, además del personal entrenado en el manejo de esta técnica. A los inconvenientes mencionados, hay que añadir la dificultad de estimar la biodegradabilidad mediante la pérdida de masa en materiales que en un estado de avanzada degradación sean difíciles de manipular debido a la difícil separación de estos de la matriz de compostaje.

Se podría reducir la incidencia de estos inconvenientes mediante el desarrollo de nuevas metodologías que permitan estimar de manera rápida, no invasiva y a bajo costo determinados parámetros utilizados para evaluar la biodegradabilidad. Una alternativa es el uso de imágenes, por ejemplo, adquiridas con teléfonos celulares, que son equipos de alta disponibilidad y accesibilidad, implementando sistemas que permitan su integración con el uso de software libre para el análisis de las imágenes de las muestras sometidas a compostaje.

Una de las alternativas es el software libre ImageJ [30], el cual ha sido utilizado en diferentes contextos, por ejemplo, para medir la talla de peces [31], o para cuantificar la asimetría de la forma nuclear en imágenes digitales obtenidas a partir de muestras citológicas e histológicas [32]. Cabe mencionar que la bibliografía actual no reporta metodologías de determinación de la biodegradabilidad de materiales plásticos mediante el uso de imágenes, como tampoco se ha reportado metodologías específicas utilizando teléfonos celulares, así como del software libre ImageJ.

De modo que el objetivo de la investigación fue evaluar la aplicabilidad del análisis de imágenes adquiridas con un teléfono celular, y procesadas con el software libre ImageJ, para estimar el grado de biodegradabilidad en muestras de bioplásticos de almidón de oca (*Oxalis tuberosa*) a partir de su porcentaje de desintegrabilidad en condiciones de compostaje.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Extracción del almidón

Como biopolímero se utilizó almidón de oca (*Oxalis tuberosa*), cuya extracción se realizó en base a la metodología de molienda húmeda [19], con algunas modificaciones. La oca fue lavada, pelada y cortada en cubos de 1 cm³, para luego ser suspendidos en agua y triturados mediante un procesador de alimentos (Modelo I5, Industrias Maguiña, Perú) por un tiempo de 5 minutos. La masa resultante se suspendió en una solución de bisulfito de sodio de 1500 ppm obteniendo una lechada, la cual se filtró para separar la fibra, la cual fue sometida dos veces a licuado para extraer la máxima cantidad posible de almidón.

El filtrado se dejó sedimentar a 4 °C por 24 horas. Transcurrido este tiempo, el líquido sobrenadante se eliminó y el sedimento de almidón se lavó con agua destilada y se dejó sedimentar nuevamente a 4 °C por 24 horas, repitiendo estos pasos tres veces. El almidón obtenido fue secado a 37 °C durante 48 horas, tras lo cual se molió y fue tamizado para obtener gránulos de 45 µm, almacenando en frascos con cierre de tapa hermética para su posterior uso.

2.2. Elaboración de bioplástico a base de almidón

Se elaboraron espumas a base del almidón de oca y agua destilada, en relación 1/1, además de glicerol al 1% (plastificante). Se mezclaron los tres componentes durante 10 minutos hasta obtener una masa homogénea. La masa resultante se dispersó homogéneamente en un molde circular de teflón antiadherente de 15 cm de diámetro, bajo presión. Finalmente se procedió a secar en una estufa UN55 PLUS (Memmert GmbH Co. KG, Alemania) por un tiempo de 30 minutos. El procedimiento seguido se muestra en la Figura 1.

2.3. Evaluación de la biodegradabilidad de los bioplásticos

Se tomó como referencia la Norma UNE-EN 13432:2001, en base a la cual se determina la biodegradabilidad a través de la desintegración física del material plástico en fragmentos de tamaño inferior a 2 x 2 mm y pérdida de visibilidad del residuo (ausencia de contaminación visual) antes de 90 días de compostaje, además de alcanzar el 90% de pérdida de la masa antes de 180 días. La metodología se desarrolló según Ref. [4], con algunas modificaciones. Las espumas fueron cortadas en cuadrados de 25 x 25 mm y se colocaron en placas petri, adicionando compost con un contenido de humedad entre 40-50%, en una proporción 6/1 (compost/muestra). Finalmente, se cubrieron con una malla fina y compost en la parte superior.

A diferentes intervalos de tiempo, cada placa conteniendo las muestras de bioplástico fue colocada en el dispositivo preparado para la adquisición de las imágenes, como se muestra en la Figura 2. Tras la toma de las imágenes, las muestras se retiraron del compost y se pesaron individualmente para determinar la pérdida de masa durante su degradación. Se trabajó con 69 muestras en un tiempo total de 89 días, fijando intervalos de tiempo de 0, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 41, 45, 49, 53, 57, 61, 65, 69, 73, 77, 81, 85 y 89 días para la medición de las muestras.



Figura 1. Esquema del proceso de elaboración de los bioplásticos a base de almidón de oca.

2.3.1. Determinación de la pérdida de masa: método gravimétrico

Se determinó el porcentaje de pérdida de masa considerando la masa inicial (M_i) y la masa en cada medición (M_m), de acuerdo con la Ecuación 1, representando gráficamente la pérdida de masa en función del tiempo durante el periodo de estudio.

$$\text{Pérdida de masa (\%)} = \frac{M_i - M_m}{M_i} \times 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

2.3.2. Determinación de la desintegrabilidad: análisis de imágenes

Para la adquisición de las imágenes se acondicionó una caja negra para evitar el reflejo de la luz, cuyas dimensiones fueron 23 x 14 x 13 cm (Figura 2). La caja fue diseñada para capturar las imágenes a una distancia fija por lo que se realizó una abertura en la parte superior, para fijar el teléfono celular, smartphone Huawei POT-LX3 (Huawei Device Co., Ltd., China) equipado con una cámara de 13 megapíxeles.

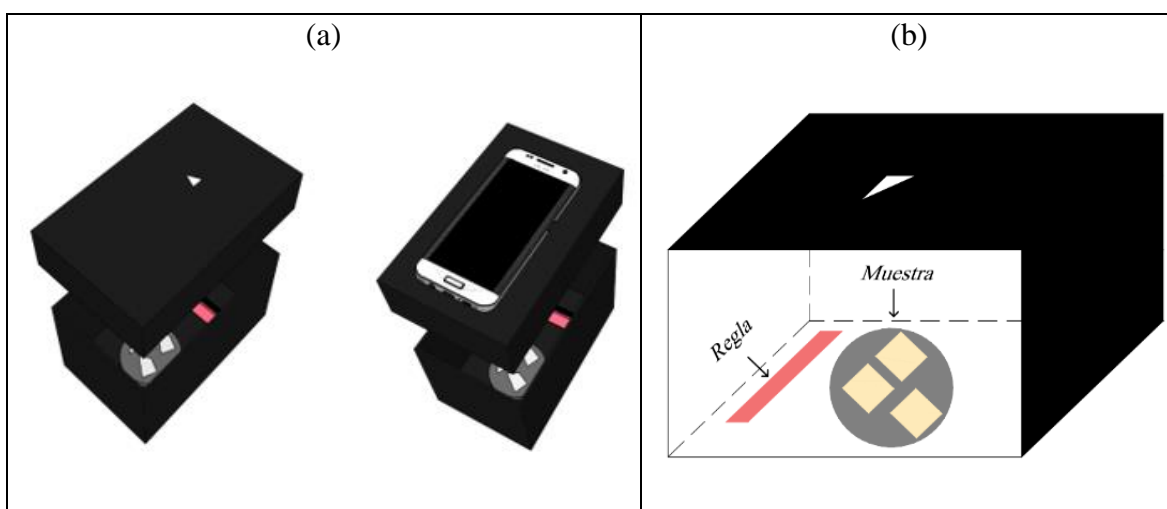


Figura 2. Vista de (a) conjunto del sistema para la toma de imágenes con el smartphone, y (b) interior de la caja para la adquisición de las imágenes.

Cada placa conteniendo las muestras de bioplástico (Figura 3.1) fue colocada en la caja negra para adquirir la imagen mediante el smartphone (Figura 3.2), procediendo a guardar cada archivo en formato JPEG (Joint Photographic Expert Group) [20].

Las imágenes fueron posteriormente procesadas en un ordenador (Figura 3.3) utilizando el software libre Image J® 1.43u (descargado desde <https://imagej.nih.gov/ij>) (Figura 3.4), seleccionando la región de interés mediante segmentación y cuantificando el área correspondiente a cada muestra a fin de determinar el porcentaje de desintegrabilidad mediante la relación entre el área inicial de cada muestra (A_i) y el área al momento de cada

medición (A_m), de acuerdo con la Ecuación 2, representando gráficamente la desintegrabilidad en función del tiempo durante el periodo de estudio.

$$\text{Desintegrabilidad (\%)} = \frac{A_i - A_m}{A_i} \times 100 \quad \text{Ecuación (2)}$$

2.3.3. Predicción de la biodegradabilidad a partir del análisis de imágenes

Con las áreas (equivalentes al porcentaje de desintegrabilidad) determinadas en la sección C.2, se utilizó el software Datafit para establecer la relación con la pérdida de masa de cada muestra, obteniendo un modelo que permita predecir el nivel de biodegradabilidad a partir de las áreas correspondiente a las imágenes digitales de cada muestra.

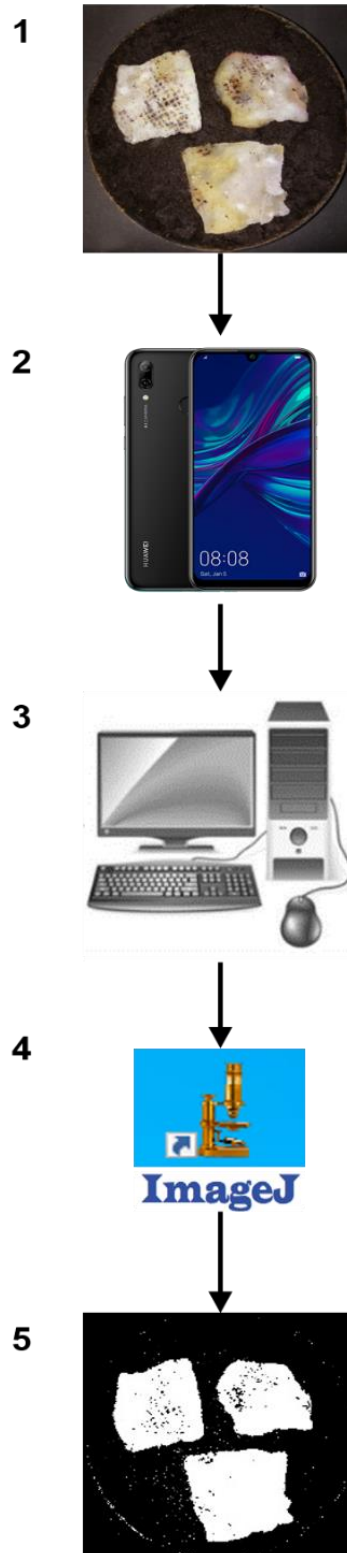


Figura 3. Esquema del proceso de la adquisición y procesamiento de las imágenes de las muestras de bioplástico.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Biodegradabilidad mediante el método gravimétrico

Los plásticos se biodegradan por acción de los microorganismos presentes en el suelo con el que están en contacto. En el caso de las espumas de almidón, en condiciones de compostaje aeróbico, como el aplicado en el presente estudio, la bibliografía consultada reporta la acción de bacterias y hongos presentes en el compost [21], los cuales desintegran los polímeros como el almidón, en monómeros, para obtener energía para sus procesos vitales. Como productos de este metabolismo, estos microorganismos liberan CO₂, H₂O o CH₄, proceso conocido como mineralización [33]. Las espumas también se pueden degradar mediante el crecimiento de hongos, que causan hinchazón y explosión a pequeña escala en la matriz polimérica [33], facilitando, por tanto, el proceso de degradación al exponer una mayor área de contacto con los microorganismos responsables de mineralizar los polímeros.

Los datos obtenidos fueron modelados utilizando el software Datafit, seleccionando el modelo con el mayor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8774$), a partir de los diferentes modelos adquiridos del mencionado software, los cuales se pueden observar en la Tabla 1.

TABLA 1
Modelos matemáticos para la pérdida de masa mediante el software Datafit (X:día)

MODELO	ERROR EST.	R ²	R ² ADJUS.
$a*X/(b+X)$	9.3450	0.8795	0.8774
$a*X^4+b*X^3+c*X^2+d*X+e$	9.4573	0.8830	0.8744
$a+b*X+c*X^{1.5}$	9.5231	0.8770	0.8727
$a*X^2+b*X+c$	9.6911	0.8726	0.8682

En la Figura 4 se visualiza la curva de evolución de los porcentajes de pérdida de masa de las muestras sometidas a compostaje. La Norma UNE-EN 13432:2001 establece una pérdida de masa del 90% en un periodo menor a 180 días.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, luego de aplicar el modelo (Figura 4), el 90% de pérdida de masa se alcanzaría en el día 101, es decir se estaría cumpliendo con la mencionada norma. Estudios previos reportan la biodegradabilidad de materiales a base de poliéster y almidón, logrando en la fase de meseta un 75.42%, por debajo de la biodegradabilidad establecida en la norma UNE-EN 13432:2001 [22]. Estas diferencias en la biodegradabilidad se pueden explicar en las características microbiológicas y la heterogeneidad del compost, lo que determina diferentes niveles de descomposición para los materiales estudiados [23].

Otro estudio evaluó la degradabilidad de bolsas de almidón, polihidroxibutirato, botellas de aceite de ácido poliláctico y bolsas comerciales de polietileno [24], logrando un 86% de biodegradación en la primera muestra. En otro estudio se alcanzaron niveles bajos de biodegradabilidad para bioplásticos, celulosa y polietileno de baja densidad con 64.21%, 63.51% y 6.95%, respectivamente [25].

Los resultados obtenidos en la presente investigación también difieren del periodo para alcanzar el 90% de pérdida de masa obtenido previamente en bioplásticos a base de almidón de camote y fibra de bagazo de caña [4], donde se alcanzó un 95% de pérdida de masa a los 42 días de compostaje. Del mismo modo, difiere en el periodo de biodegradabilidad de dos semanas, obtenido en bioplásticos a base de mango y plátano [26], lo cual estaría relacionado con las características del compost utilizado [23], además de las condiciones ambientales bajo las cuales se realiza el compostaje, de modo que la optimización de estos parámetros es

de vital importancia para asegurar una adecuada degradación de lo bioplásticos dentro de los criterios establecidos por la normativa vigente [22].

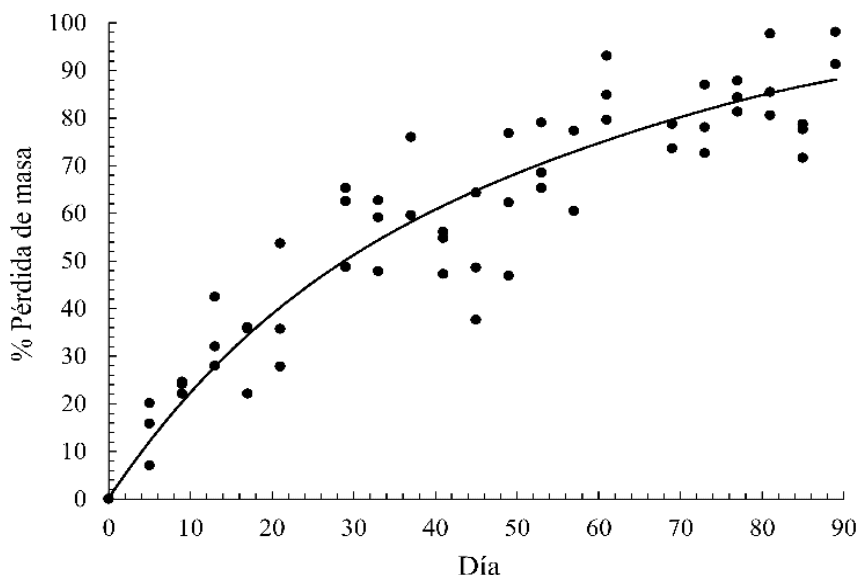


Figura 4. Evolución del porcentaje de pérdida de masa de los bioplásticos a base de almidón de oca. Modelo: $[Y = 132.01 * X / (46.91 + X)]$, $R^2 = 0.8774$.

3.2. Biodegradabilidad mediante análisis de imágenes

Los datos obtenidos fueron modelados utilizando el software Datafit, seleccionando el modelo con el mayor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.7489$) (Tabla 2).

TABLA 2
Modelos matemáticos para la desintegrabilidad visual mediante el software Datafit (X:día)

MODELO	ERROR EST.	R ²	R ² ADJUS.
$a+b*X^{0.5}+c*\exp(-X)$	10.3310	0.7582	0.7489
$a+b*X+c*X^{0.5}$	10.8925	0.7312	0.7209
$a+b*X^{1.5}+c*X^{0.5}$	10.9961	0.7261	0.7156
$a*X/(b+X)$	11.6374	0.6873	0.6814

La Figura 5 muestra la evolución del porcentaje de desintegrabilidad de las muestras sometidas a compostaje. La Norma UNE-EN 13432:2001 establece una desintegrabilidad de al menos un 90% en un periodo menor a 90 días. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, luego de aplicar el modelo (Figura 5), en el día 89 se alcanzaría tan solo un 74% de desintegrabilidad, porcentaje menor al establecido en la mencionada norma, de 90% de desintegrabilidad, que sería alcanzando en un periodo de 145 días.

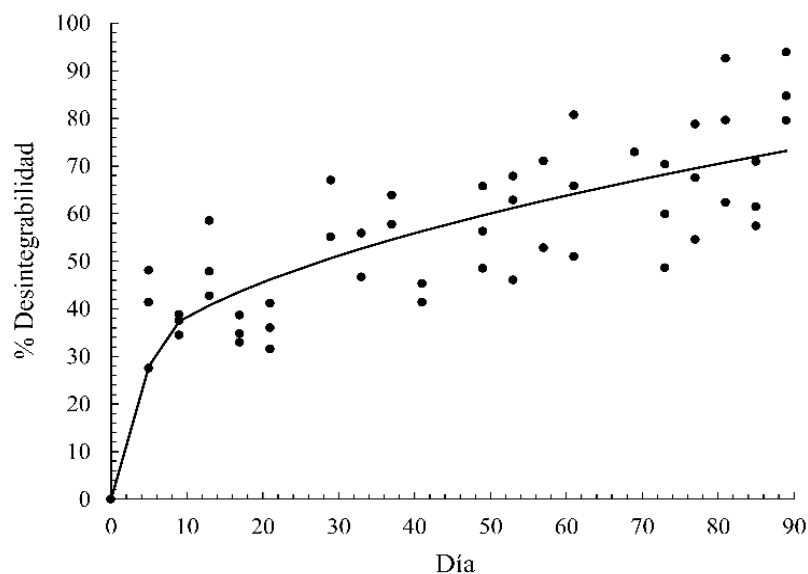


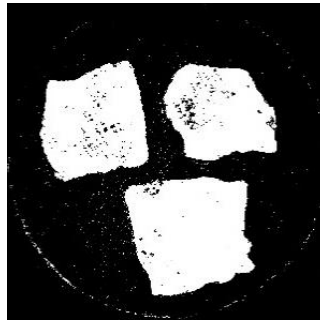
Figure 5. Evolución del porcentaje de desintegrabilidad de los bioplásticos a base de almidón de oca. Modelo: $[Y = 20.74 + 5.56 * X^{0.5} + (-20.70) * \exp(-X)]$, $R^2 = 0.7489$

Las técnicas basadas en el análisis de imágenes se han vuelto más predominantes para la inspección y el control de procesos de una manera rápida y no invasiva. No obstante, para asegurar el desarrollo de modelos robustos que permitan predecir determinados parámetros es necesario optimizar la toma de datos, además de un adecuado procesamiento que permita eliminar el ruido y evitar errores en las estimaciones [27]. Ello indica la necesidad de más estudios, por ejemplo, mediante la aplicación de análisis multivariante que permitan predecir la desintegrabilidad de las muestras a partir de la información extraída de las imágenes, así

como el desarrollo de modelos de predicción que establezcan relaciones entre dicha información y la información obtenida a partir del método gravimétrico tradicional.

La Figura 6 muestra las imágenes de la evolución de las muestras en una de las placas durante el periodo de estudio (89 días). Las imágenes fueron procesadas utilizando el software ImageJ, en base al cual se puede estimar el área de una región de interés [27], que, en este caso, corresponde al área ocupada por cada muestra de bioplástico, y en base a dicha área estimar su porcentaje de desintegrabilidad (pérdida de visibilidad).

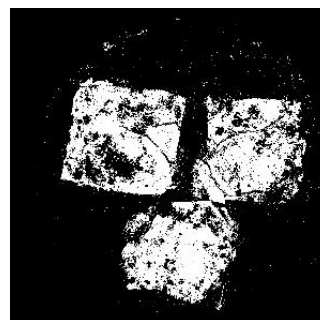
Día 5



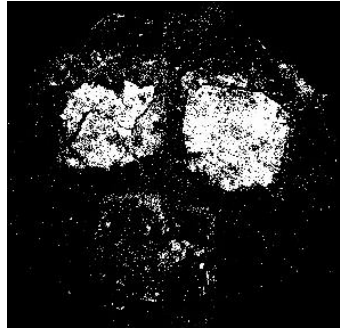
Día 29



Día 45



Día 61



Día 89

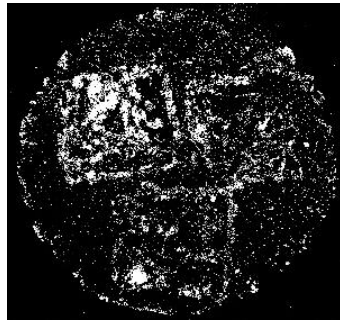


Figura 6. Seguimiento del proceso de desintegración de las muestras de bioplástico a base de almidón de oca durante los 89 días de compostaje, mediante análisis de imágenes con el software ImageJ.

Así mismo, la aplicación del análisis de imágenes adquiridas mediante el uso de teléfonos celulares para evaluar la biodegradabilidad es un tema no reportado previamente, por lo que aún no existe evidencia de optimización de metodologías que permitan establecer protocolos aplicables. Como antecedente más próximo se tiene un estudio de aplicación de imágenes adquiridas mediante el uso de cámara hiperespectral [4], si bien el reto en dicha metodología es el adecuado procesamiento de la abundante información contenida en cada imagen, lo cual se realizó mediante un análisis de Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLSR), en base al cual se predijo la biodegradabilidad de las muestras a partir de la información espectral, alcanzando un coeficiente de determinación R^2 de 0.71.

En el presente estudio, además se hizo un análisis de regresión a fin de poder relacionar la pérdida de masa con la desintegrabilidad visual, obteniendo un R^2 de 0.7868, como se puede observar en la Figura 7.

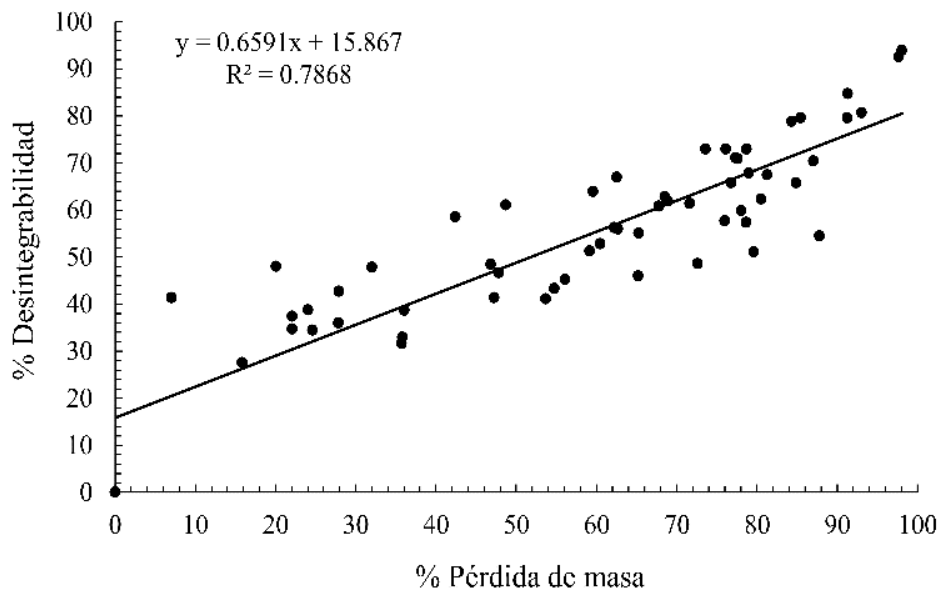


Figura 7. Relación entre porcentaje de pérdida de masa y el porcentaje de desintegrabilidad en las muestras.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES

Se evaluó la biodegradabilidad de bioplásticos a base de almidón de oca tomando como base la norma UNE-EN 13432:2001 y las imágenes adquiridas con un teléfono celular y procesadas posteriormente con el software libre ImageJ bajo el criterio de determinación de áreas. Respecto a la pérdida de masa mediante el método gravimétrico, se estimó que las muestras perdieron el 90% de su masa inicial en un periodo de 101 días de compostaje (R^2 de 0.8774), cumpliendo con lo establecido en la norma UNE-EN 13432:2001 respecto al criterio de biodegradabilidad de materiales plásticos. No obstante, respecto al criterio de desintegrabilidad de las muestras, determinada a partir del análisis de imágenes, se obtuvo tan solo un 74% de desintegrabilidad tras 89 días de compostaje (R^2 de 0.7489), lo cual indica que no se cumple con lo establecido en la norma UNE-EN 13432:2001. Los resultados indican la necesidad de optimizar las condiciones de adquisición de las imágenes, así como el desarrollo de modelos predictivos más robustos, permitiendo de ese modo aprovechar el potencial de la aplicación del análisis de imágenes, el uso de software libre y el uso de teléfonos celulares, como herramientas para estimar la biodegradabilidad de bioplásticos, no reportado en la bibliografía actual.

REFERENCIAS

1. Organización de las Naciones Unidas. 2019. La tecnología puede convertir en riqueza los desechos de las ciudades. <https://news.un.org/es/story/2019/10/1463472>
2. Organización de las Naciones Unidas. 2018a. Crean una coalición mundial contra los empaques de plástico de un solo uso. <https://news.un.org/es/story/2018/10/1444552>
3. S. Kubowicz, and A. Booth. 2017. Biodegradability of Plastics: Challenges and Misconceptions. *Environmental Science and Technology*, 51, 12058-12060.
4. R. Vejarano. 2017. Biodegradabilidad de bandejas a base de almidón de camote (*Ipomea batata*), fibra de bagazo de caña (*Saccharum officinarum*) y glicerina según la norma UNE-EN 13432:2001 y utilizando imágenes hiperespectrales. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Trujillo, Perú
5. S. Odusanya, et al. 2013. Preliminary Studies on Microbial Degradation of Plastics Used in Packaging Potable Water in Nigeria. *Nigerian Food Journal*, 31(2), 63-72.
6. M. Socas. 2018. Contaminación por residuos: Islas de Plástico. Tesis de grado. Universidad de La Laguna.
7. L. Lebreton, et al. 2018. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, 8.
8. Organización de las Naciones Unidas Medio Ambiente. 2018b. Perspectiva de la gestión en de residuos en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina para América Latina y el Caribe. Ciudad de Panamá, Panamá.
9. Y. Tokiwa, B. Calabia, Ch. Ugwu and S. Aiba. 2009. Biodegradability of Plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), 3722-3742

10. M. Valero-Valdiviezo, Y. Ortegón and Y. Uscategui. 2013. Biopolímeros: avances y perspectivas. *Scielo*, 171-180
11. B. Bahramian, A. Fathi and F. Dehghani. 2016. A renewable and compostable polymer for reducing consumption of non-degradable plastics. *Polymer Degradation and Stability*, 1-27. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.08.014
12. H. Alarcón and E. Arroyo. 2016. Evaluacion de las propiedades quimicas y mecanicas de los biopolimeros a partir de almidón modificaado de la papa. *Revista Sociedad Química Perú*, 82(3), 315-323.
13. L. Rodriguez and C. Orrego. 2016. Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos:revisión bibliográfica. *Revista Científica*, 25, 252-264.
14. D. Navia, H. Villada and A. Ayala. 2013. Evaluación mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados con harina de yuca. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 1(2), 77-84.
15. American Society for Testing and Materials. 2009. Vida nueva para los plásticos – Normas para plásticos biodegradables y bioderivados. ASTM Standarización News. https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMJ09/quigley_spmj09.html
16. D. Briassoulis, A Mistriotis, N. Mortier and M. Tosin. 2019. A horizontal test method for biodegradation in soil of bio-based and conventional plastics and lubricants. *Journal of Cleaner Production*, 242.
17. D. Tushie. 2012. Standards for Aerobic – Biodegradation Testing of Plastic Materials. ICMA Card Manufacturing, 26-28. http://www.icma.com/ArticleArchives/AerobicBiodegrad_SE2-12.pdf

18. M. Funabashi, F. Ninomiya and M. Kunioka. 2009. Biodegradability evaluation of polymers by ISO 14855-2. Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 10, 3635-3654.
19. J.P. Cruz-Tirado, R. Vejarano, D.R. Tapia-Blácido, G. Barraza-Jáuregui, and R. Siche. 2019. Biodegradable foam tray based on starches isolated from different Peruvian species. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 800-807.
20. R. Swetha et al. 2020. Predicting soil texture from smartphone-captured digital images and an application. *Geoderma*, 376.
21. D. Feghali, L. Tauk, P. Ortiz, K. Vanbroekhoven and W. Eevers. 2020. Catalytic chemical recycling of biodegradable polyesters. *Polymer Degradation and Stability*, 179.
22. AENOR. 2001. Norma UNE-EN 13432: Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje. Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR. Madrid, España.
23. A. Fernando. 2015. Análisis de la Degradación, Desintegración y Biodegradabilidad de bolsas de Poliéster y Almidón en compostaje de residuos urbanos: escalas de laboratorio e industrial. (Tesis de Licenciatura). Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes – Madrid, España.
24. R. Torrejón et al. 2011. Biodegradabilidad aeróbica de material plástico de empaque bajo condiciones controladas de compostaje. Grupo Ingenio Colombiano.

25. P. Meza. 2016. Elaboración de bioplásticos a partir de almidón residual obtenido de peladoras de papa y determinación de su biodegradabilidad a nivel de laboratorio. (Tesis de Grado). Universidad Nacional Agraria La Molina.
26. R. Chinchayhuara and R. Quispe. 2018. Elaboración de bioplásticos con residuos a base de cascara de plátano y mango para reducir la contaminación por el uso de plásticos sintéticos en Trujillo. (Tesis de grado). Universidad Cesar Vallejo, Trujillo – Perú.
27. A. Raju. 2016. A survey on computer vision technology for Food Quality Evaluation. *Internacional Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 4(8).
28. J.P. Cruz-Tirado, et al. 2017. Properties of baked foams from oca (*Oxalis tuberosa*) starch reinforced with sugarcane bagasse and asparagus peel fiber. *Procedia Engineering* 200, 178-185.
29. J.P. Cruz-Tirado, R. Vejarano, D. Tapia-Blácido, G. Barraza-Jáuregui, R. Siche. 2019. Biodegradable foam try based on starches isolated from different Peruvian species. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 800-807.
30. C. Rueden, et al. 2017. ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 18, 529.
31. N. Andrialovanirina, D. Ponton, F. Behivoke, J. Mahafina and M. Léopold. 2020. A powerful method for measuring fish size of small-scale fishery catches using ImageJ. *Fisheries Research*, 223, 105425.
32. YM. Bozhok, O. Golovko and AG. Nikonenko. 2020. NPAsym: an open-source plugin for ImageJ to quantify nuclear shape asymmetry. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 105562.

33. A. Ali, F. Hasan, A. Hameed and S. Ahmed. 2008. Biological degradation of plastics:
A comprehensive review. *Biotechnology Advances* 26, 246-265.