CAPÍTULO 14

Caracterización morfológica automatizada de gránulos de almidón de yuca mediante procesamiento digital de imágenes SEM y herramientas de código abierto

Automated morphological characterization of cassava starch granules through digital SEM image processing and open-source tools

1 Edisson Fernando Calderón Freire
Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de Materiales
Universitat Politècnica de València, Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, España
edcalfr@upv.edu.es
https://orcid.org/0000-0002-3955-8162

2 Cristian David Redroban Dillon
Magíster en Ingeniería Automotriz, mención en Autotrónica y Nuevas Tecnologías de Propulsión
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de investigación INVELECTRO, Ecuador
david.redroban@espoch.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-3543-9390

3 José Enrique Crespo Amorós
Doctor
Universitat Politècnica de València, Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, España
jocream@dimm.upv.es
https://orcid.org/0000-0003-1372-4289

DOI https://doi.org/10.64644/9789907956313_14 RECIBIDO 02/09/2026 | ACEPTADO 13/10/2026

RESUMEN

El desarrollo de espumas biodegradables a partir de almidón de yuca mediante extrusión reactiva representó el contexto de aplicación de esta investigación, en la que se consideró la caracterización morfológica del material de partida como una etapa preliminar para su posterior procesamiento. El estudio tuvo como objetivo caracterizar la distribución de tamaños de gránulos de tres muestras comerciales de almidón de yuca mediante un procedimiento automatizado de análisis de imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM). Se realizó un estudio cuantitativo, descriptivo y exploratorio, basado en el procesamiento de 42 micrografías SEM correspondientes a las muestras A1, B1 y C1, seleccionadas por su disponibilidad comercial. Se implementó un flujo de trabajo en Python, dentro del entorno Google Colab, que integró preprocesamiento de imágenes, segmentación mediante watershed, extracción de parámetros morfométricos y análisis estadístico. Se identificaron 3460 objetos segmentados, distribuidos en 2187, 868 y 405 para A1, B1 y C1, respectivamente. Los diámetros equivalentes medios fueron de 6,99 ± 7,44 µm, 7,09 ± 10,01 µm y 9,33 ± 14,30 µm. Se observaron diferencias descriptivas en la dispersión y distribución de tamaños; sin embargo, la comparación exploratoria mediante Kruskal–Wallis, aplicada a las medianas por micrografía, no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre las muestras (p = 0,879). Se realizó una caracterización complementaria mediante ImageJ sobre 120 gránulos seleccionados, como referencia morfométrica independiente. Se concluyó que el

procedimiento permitió obtener indicadores descriptivos de la morfología granular y constituyó una base metodológica para investigaciones posteriores, aunque su interpretación estuvo condicionada por los criterios de segmentación, las condiciones de adquisición de imágenes y las limitaciones del muestreo.

Palabras clave: almidón de yuca, extrusión reactiva, caracterización morfológica, procesamiento automatizado de imágenes, espumas biodegradables

ABSTRACT

The development of biodegradable foams from cassava starch via reactive extrusion provided the application context for this research, which considered the morphological characterization of the starting material as a preliminary step for subsequent processing. The study aimed to characterize the granule size distribution of three commercial cassava starch samples using an automated image analysis procedure based on scanning electron microscopy (SEM). A quantitative, descriptive, and exploratory study was conducted, processing 42 SEM micrographs corresponding to samples A1, B1, and C1, which were selected based on commercial availability. A Python workflow was implemented within the Google Colab environment, integrating image preprocessing, watershed segmentation, morphometric parameter extraction, and statistical analysis. A total of 3,460 segmented objects were identified, distributed as 2,187, 868, and 405 for samples A1, B1, and C1, respectively. Mean equivalent diameters were 6.99 ± 7.44 µm, 7.09 ± 10.01 µm, and 9.33 ± 14.30 µm. Descriptive differences in size dispersion and distribution were observed; however, an exploratory comparison using the Kruskal–Wallis test—applied to medians per micrograph—revealed no statistically significant differences between the samples ($p = 0.879$). A complementary characterization was performed using ImageJ on 120 selected granules to serve as an independent morphometric reference. It was concluded that the procedure enabled the determination of descriptive indicators regarding granular morphology and established a methodological basis for future research, although its interpretation was influenced by segmentation criteria, image acquisition conditions, and sampling limitations.

Keywords: cassava starch, reactive extrusion, morphological characterization, automated image processing, biodegradable foams

1. Introducción

El crecimiento del consumo de polímeros sintéticos derivados del petróleo ha generado importantes impactos ambientales asociados a la acumulación de residuos plásticos (Kumari et al., 2023). Estos materiales convencionales, ampliamente utilizados en aplicaciones de embalaje y protección, presentan tiempos de degradación extremadamente largos y contribuyen significativamente a la acumulación de residuos plásticos en el ambiente (Jambeck & Walker-Franklin, 2023). En este contexto, los materiales biodegradables derivados de recursos renovables han sido objeto de creciente investigación, adquiriendo relevancia científica y tecnológica, debido a su potencial para reducir la dependencia de polímeros convencionales, y sustituirlos en diferentes aplicaciones industriales (Amaraweera et al., 2022; C. Chen et al., 2026).

El almidón es un polisacárido natural compuesto principalmente por amilosa y amilopectina (Ai & Jane, 2024), es uno de los biopolímeros más utilizados para la producción de materiales

biodegradables debido a su abundancia, bajo costo y capacidad de procesamiento mediante técnicas termomecánicas (Sirbu et al., 2024). Cuando el almidón es sometido a condiciones adecuadas de temperatura, humedad y esfuerzo mecánico, puede experimentar un proceso conocido como gelatinización, durante el cual su estructura granular se desorganiza y permite la formación de matrices poliméricas capaces de generar materiales con diferentes propiedades físicas (Ai & Jane, 2015).

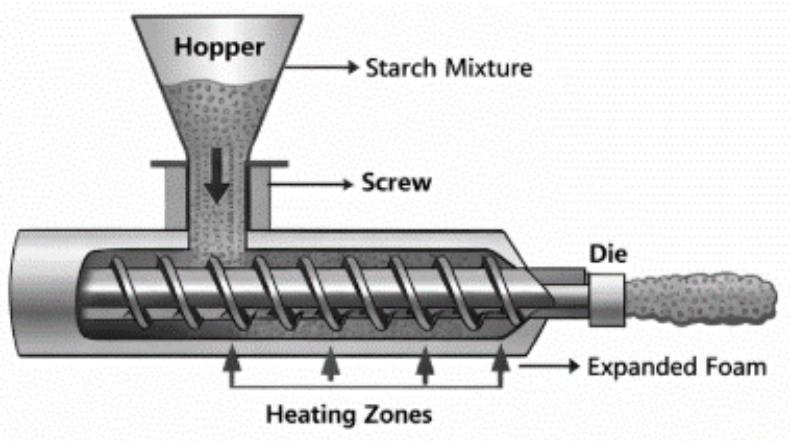
Uno de los métodos más utilizados para transformar el almidón en materiales expandibles es el proceso de extrusión. La extrusión es una técnica de procesamiento continuo ampliamente empleada en la industria de polímeros y alimentos (Chung, 2019), como se muestra en la Figura 1, en la cual el material es transportado mediante un tornillo rotatorio dentro de un cilindro calentado, donde se somete simultáneamente a presión, temperatura y esfuerzo cortante (Hyvärinen et al., 2020).

Durante el proceso de extrusión, el almidón puede transformarse en una estructura expandida generando espumas con propiedades adecuadas para aplicaciones de empaque (Soykeabkaew et al., 2015), estas condiciones favorecen la modificación estructural y permiten la formación de celdas homogéneas extendidas cuando la mezcla fundida sale del dado de extrusión (McCrum et al., 2026).

Diversas investigaciones han demostrado que la producción de espumas biodegradables a base de almidón mediante extrusión depende principalmente de tres factores fundamentales: la composición de la mezcla, el contenido de humedad y los parámetros de procesamiento (Nabar et al., 2005). En particular, la adición de plastificantes es esencial para mejorar la procesabilidad del almidón durante el proceso de extrusión. Entre los plastificantes más utilizados se encuentra el glicerol, un compuesto orgánico que actúa reduciendo las interacciones intermoleculares entre las cadenas poliméricas del almidón, lo que aumenta la flexibilidad del material y facilita su transformación en estructuras espumadas (Nabar et al., 2005).

Figura 1

Esquema del proceso de extrusión



Nota. Elaboración propia.

El agua también desempeña un papel fundamental en el procesamiento del almidón, ya que actúa como plastificante natural, facilita la gelatinización del polímero y se presenta como un agente espumante en la reacción química justo después del dado extrusor (Meng et al., 2019).

Las condiciones de procesamiento también juegan un papel determinante en la formación de la estructura celular del material (Chung, 2019). Parámetros como la temperatura de extrusión, la velocidad de rotación del tornillo y la presión dentro del cilindro influyen directamente en la viscosidad de la mezcla y en la expansión del material al salir del dado (Alexander & Contreras, 2017). Estudios experimentales han demostrado que temperaturas de extrusión comprendidas entre 120 °C y 180 °C favorecen la gelatinización completa del almidón y la formación de estructuras celulares estables (Engel et al., 2019).

No obstante, el proceso de extrusión implica condiciones severas de operación que incluyen temperatura elevada, presión y esfuerzos de corte (Zhuang et al., 2023). Bajo estas condiciones, la presencia de agua, plastificantes y reactivos químicos puede generar interacciones con los materiales metálicos del sistema de extrusión, particularmente en el husillo y el cilindro del equipo (De Smit et al., 2022). Por lo tanto, resulta necesario analizar las formulaciones utilizadas en investigaciones previas sobre espumas de almidón, así como evaluar los posibles efectos de estas mezclas sobre superficies metálicas utilizadas en sistemas de procesamiento y fundamentalmente, la forma de la partícula de almidón, para pronosticar mejores propiedades de la espuma extruida.

Esto implica que la etapa inicial en el desarrollo de este material es la adecuada selección del material base (Figueiró et al., 2024). En conjunto, la literatura científica demuestra que el desarrollo de espumas biodegradables de almidón mediante extrusión requiere un enfoque integral que considere simultáneamente la formulación química del material, los parámetros de procesamiento y la interacción con los componentes del sistema de extrusión.

La caracterización morfológica de los gránulos de almidón permite describir diferencias en su tamaño, forma y distribución (Z. Chen et al., 2025), aspectos relevantes para comparar materias primas de distintas procedencias. Estas características también constituyen variables de interés para investigaciones posteriores sobre gelatinización, modificación química y procesamiento por extrusión, cuyas relaciones deben evaluarse mediante ensayos específicos (Sun et al., 2025).

Los gránulos de almidón presentan una morfología, tamaño y distribución de partículas que varían notablemente según la fuente botánica, constituyendo la huella digital del origen (Li et al., 2023). Esta diversidad es observable mediante técnicas microscópicas. Investigaciones recientes relacionadas con el almidón de papa presenta gránulos de tamaño extremadamente variable (2,7 – 70,7 µm) y forma lenticular, mientras que el de arroz contiene gránulos notablemente más pequeños, generalmente inferiores a 10 µm pero de contorno irregular o poligonal (Guo et al., 2023; Z. Chen et al., 2025).

El almidón presente en cereales del grupo Triticeae, como el trigo y la cebada, presenta dos tamaños claramente diferenciados (distribución bimodal); gránulos tipo A (de mayor tamaño, superando los 10 µm) y gránulos tipo B (más pequeños, con un diámetro igual o menor a 10 µm) (Kim & Huber, 2010). Esta distribución bimodal no solo es una característica morfológica

distintiva, sino que también implica diferencias en la composición química, estructura molecular y propiedades fisicoquímicas entre ambas poblaciones de gránulos. En contraste, el almidón de maíz, trigo sarraceno y yuca presentan una distribución de tamaño más unimodal, con gránulos de formas poligonales o esféricas (Binou et al., 2022).

La yuca (Manihot esculenta) contiene gránulos de almidón que, en términos generales, presentan un tamaño que puede variar, aunque no presentan la bimodalidad característica del trigo. Su morfología es típicamente redondeada o truncada, con una superficie lisa (Barrera et al., 2013). La comprensión de estas características morfológicas de base es esencial, ya que modificaciones posteriores, ya sean de origen mecánico, químico o térmico, alterarán esta estructura superficial, afectando su funcionalidad (Teobaldi et al., 2025).

La integración de herramientas computacionales, particularmente aquellas basadas en el lenguaje de programación Python, ha revolucionado el análisis de micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM), transformando un proceso tradicionalmente manual y subjetivo en una tarea automatizada, rápida y cuantitativamente robusta (Sozzi et al., 2025).

El análisis manual de imágenes SEM para la determinación del tamaño y la morfología de gránulos de almidón es un proceso que demanda una inversión significativa de tiempo y recursos humanos (Götz et al., 2021). La necesidad de procesar grandes volúmenes de datos, a menudo provenientes de múltiples muestras y condiciones experimentales, convierte a esta tarea en un cuello de botella que limita la productividad investigativa (Rui-Heng et al., 2026). La automatización emerge como la solución idónea para superar estas barreras, ofreciendo una serie de ventajas sustanciales.

Estos métodos se fundamentan en técnicas de procesamiento digital de imágenes, como la segmentación por umbrales, la detección de bordes y la morfología matemática. En este caso, la relevancia de cada etapa del proceso resulta fundamental para el desarrollo de un material adecuado, escalable y reproducible a nivel industrial. Cada paso ejecutado en el proyecto no solo representa oportunidades ambiciosas, sino que determinará consecuencias de gran alcance en la obtención de un material biodegradable diseñado específicamente para reducir el impacto ambiental. En este contexto, el objetivo principal de esta investigación es caracterizar morfológicamente y cuantificar la distribución de tamaños de gránulos de almidón de yuca, provenientes de diferentes proveedores, mediante análisis automatizado de imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM). El estudio se circunscribe a la evaluación morfológica de las materias primas y constituye una etapa preliminar de investigación orientada al desarrollo de espumas biodegradables.

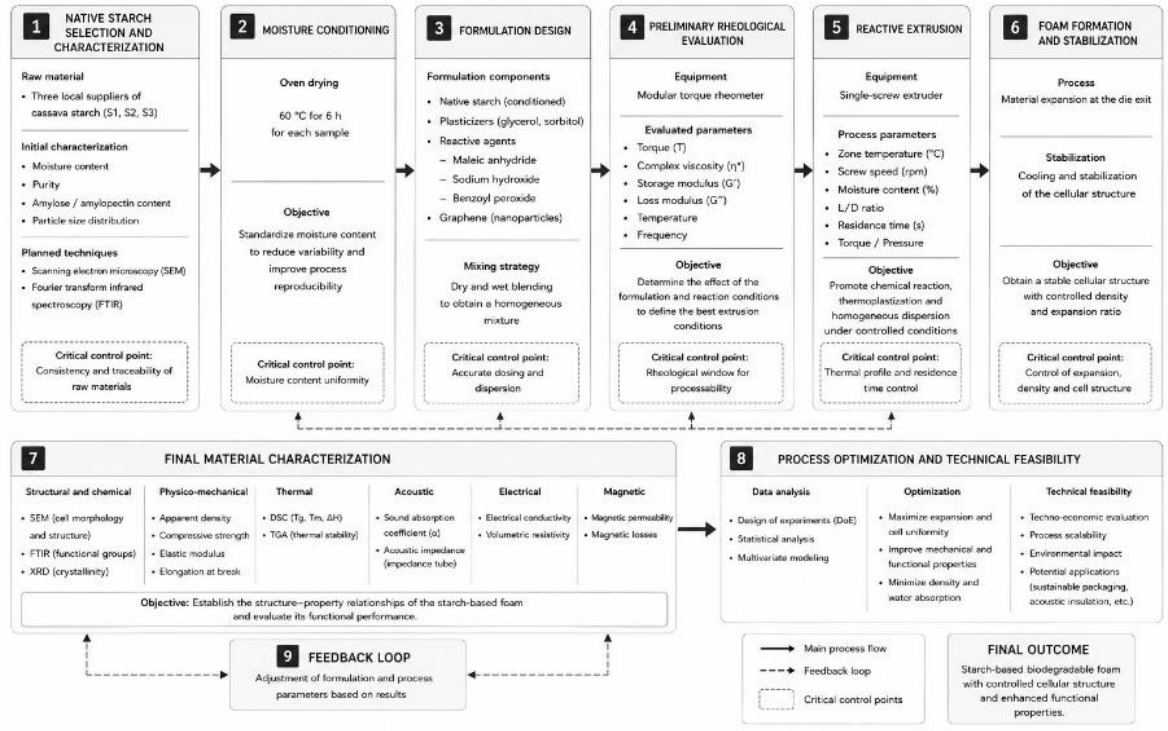
Por tanto, no contempla la modificación química del almidón, su procesamiento mediante extrusión reactiva ni la evaluación experimental de las propiedades de las espumas obtenidas. El uso de plataformas como Google Colab y herramientas de inteligencia artificial facilita el desarrollo y la adaptación de procedimientos de análisis de imágenes, planteando nuevos desafíos de reproducibilidad.

2. Métodos

La presente investigación corresponde a una etapa preliminar de caracterización de materias primas, orientada al análisis morfológico de tres muestras comerciales de almidón de yuca. Los resultados obtenidos permiten describir y comparar sus distribuciones de tamaño granular, sin evaluar en esta fase su comportamiento durante la extrusión reactiva ni las propiedades de posibles espumas biodegradables. La Figura 2 presenta el marco metodológico general de este proyecto.

Figura 2

Marco metodológico para la producción y caracterización de espumas biodegradables a base de almidón mediante extrusión reactiva



Nota. Elaboración propia.

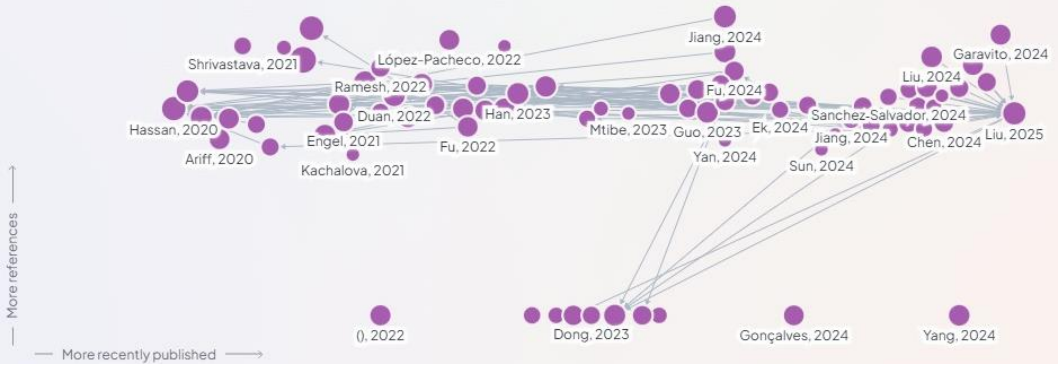
El almidón de yuca constituye una materia prima de interés para el desarrollo de materiales biodegradables debido a su disponibilidad y a las posibilidades de transformación descritas en la literatura. En este estudio se examinan exclusivamente las características morfológicas de sus gránulos, sin evaluar su comportamiento durante la extrusión ni las propiedades de las espumas obtenidas.

Como parte del desarrollo metodológico, se realiza una revisión sistemática del estado del arte empleando herramientas de análisis bibliográfico, entre ellas ResearchRabbit, para identificar las principales conexiones entre investigaciones relacionadas. El mapa bibliográfico obtenido evidencia un consenso en la literatura respecto a que la morfología del gránulo de almidón constituye un factor determinante en las propiedades mecánicas y en la expansión celular de las espumas obtenidas por extrusión, información que se presenta en la Figura 3. Se analizaron los

procedimientos típicos de preparación de muestras, los cuales generalmente incluyen la selección del almidón como matriz principal, la incorporación de plastificantes como glicerol y la adición de agua en proporciones específicas para favorecer la gelatinización del material, lo que implica que una materia prima inadecuada contribuye a errores en el procesamiento posterior.

Figura 3

Red bibliográfica generada con ResearchRabbit que muestra las relaciones entre los estudios sobre la morfología del almidón y su influencia en la producción de espumas biodegradables a base de almidón



Nota. Elaboración propia.

La Tabla 1 muestra el resultado de algunas investigaciones donde se presenta los porcentajes aproximados de los elementos que se requieren para obtener una espuma de almidón por extrusión reactiva. La caracterización morfológica del almidón constituye una etapa fundamental para garantizar la continuidad del proyecto.

Tabla 1

Composición general de mezclas

Autor	Almidón (%)	Agua (%)	Glicerol (%)	Otros aditivos	Reactivos utilizados
Z. Chen et al., 2025	70	20	10	—	plastificante
Figueiró et al., 2024	65	20	15	fibras naturales	plastificante
Engel et al., 2019	70	15	15	—	plastificante
Martin Torrejon et al., 2023	60	25	10	residuos vegetales	agentes espumantes
Meng et al., 2019	68	20	12	proteínas	plastificante

Nota. Elaboración propia.

La determinación del tamaño, la forma y la distribución de los gránulos proporciona información inicial sobre la morfología de las materias primas. Su posible relación con la gelatinización, el comportamiento durante la extrusión y las propiedades de los materiales obtenidos requiere evaluaciones experimentales adicionales.

Para realizar la caracterización morfológica se utiliza la microscopía electrónica de barrido (SEM) que se ha consolidado como una técnica robusta e indispensable para la caracterización micro y nanoestructural de almidones y harinas. Su capacidad para generar imágenes de alta resolución y gran profundidad de campo permite un análisis detallado de la morfología superficial, la forma, el tamaño, la distribución y las características topográficas de los gránulos.

El protocolo utilizado para la observación por SEM requiere la preparación de la muestra mediante secado a temperaturas inferiores a la gelatinización del almidón, para ello se exponen 3 muestras de almidón cumpliendo el siguiente ciclo de secado (temperatura: 60 °C, tiempo: 6 horas), para preservar su estructura nativa. Posteriormente, las muestras se montan sobre soportes metálicos. La observación se realiza a diferentes magnificaciones, utilizando electrones secundarios para obtener contraste topográfico y electrones retrodispersados para obtener contraste por número atómico. El equipo es un microscopio electrónico de barrido, marca ASPEX, modelo PSEM eXpress, rango de detección 500 nm a 5 mm. No se reportan las condiciones ambientales para los ensayos SEM ya que estos se realizan en una cámara cerrada en una atmósfera de alto vacío.

Finalmente, se estandariza la adquisición de imágenes mediante la obtención de 14 imágenes TIFF (Tagged Image File Format) por cada muestra de almidón. Cada micrografía incluye una barra de escala calibrada para permitir la calibración métrica durante el procesamiento de imágenes. Se selecciona el formato TIFF para preservar la calidad de la imagen y evitar artefactos de compresión, garantizando así un análisis cuantitativo fiable. Se desarrollan algoritmos automatizados de procesamiento de imágenes en Python y se implementan en el entorno de Google Colab para identificar y medir los gránulos de almidón, reduciendo sustancialmente el tiempo de análisis y proporcionando estimaciones robustas de la distribución y dispersión del tamaño de las partículas, lo que mejora la reproducibilidad y la consistencia de la caracterización morfométrica.

El procesamiento digital de las micrografías SEM se desarrolla mediante un flujo de trabajo automatizado implementado en Google Colab utilizando el lenguaje de programación Python y bibliotecas especializadas para el análisis de imágenes.

El procesamiento digital implementado para la caracterización morfométrica de las partículas de almidón observadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) se estructura en varias etapas secuenciales. En primer lugar, cada imagen en formato TIFF es convertida a escala de grises y sometida a una mejora de contraste mediante ecualización adaptativa del histograma (CLAHE), complementada con un filtro bilateral que atenúa el ruido preservando los bordes, lo cual facilita la lectura del texto de la leyenda y de la barra de escala impresas por el equipo.

En segundo lugar, se ejecuta un reconocimiento óptico de caracteres (OCR) sobre la franja superior de la imagen para extraer de forma automática el valor numérico y la unidad de la escala, y mediante la detección del segmento continuo más largo de la barra de referencia se establece la relación de conversión de píxeles a micrómetros, calibrando así cada imagen de forma independiente según su nivel de ampliación. En tercer lugar, la región de interés —una vez excluido el encabezado— es suavizada mediante un filtro gaussiano y segmentada aplicando el método de umbralización de Otsu, complementado con operaciones morfológicas de apertura y cierre para eliminar artefactos y consolidar los contornos de las partículas; posteriormente, se emplea el

algoritmo de segmentación por cuencas hidrográficas (watershed), basado en la transformada de distancia euclidiana, para individualizar aquellas partículas que se encuentran en contacto o parcialmente superpuestas.

Finalmente, sobre cada región segmentada se calculan los descriptores morfométricos —área, diámetro equivalente, longitud de los ejes mayor y menor, y circularidad— expresados en unidades físicas reales gracias a la calibración previa, generando así una base de datos cuantitativa que permite el análisis estadístico comparativo del tamaño de partícula entre las distintas micrografías analizadas.

El estudio comprende el cálculo de medidas descriptivas de tendencia central, dispersión y distribución de los diámetros equivalentes de los gránulos identificados. Adicionalmente, se realiza una comparación exploratoria entre las tres muestras mediante la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, utilizando como observaciones las medianas de diámetro equivalente obtenidas para cada micrografía (14 imágenes por muestra). Se adopta un nivel de significancia de $\alpha = 0{,}05$. Este enfoque permite considerar la agrupación de las mediciones por imagen y evitar el tratamiento de todos los objetos segmentados como observaciones experimentales independientes.

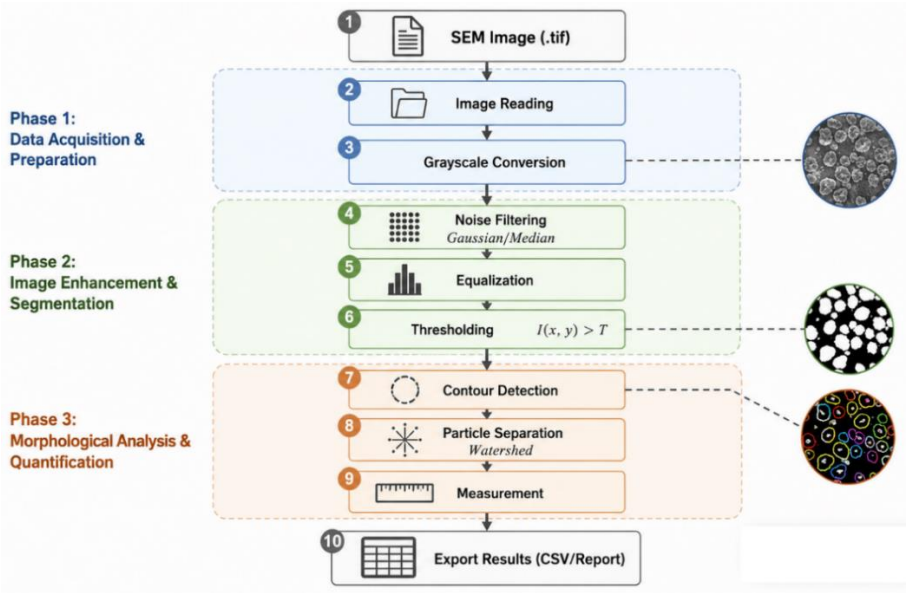
La segmentación se realiza considerando las limitaciones asociadas con la resolución de las imágenes, el contraste entre los gránulos y el fondo, y la presencia de partículas en contacto. Se distingue partículas del fondo mediante un umbral binario automático de Otsu, asumiendo mayor brillo de los gránulos respecto al sustrato, y descarta como ruido toda región con área inferior a 15 píxeles cuadrados tras la limpieza morfológica; la medición asigna a cada partícula individualizada por watershed su diámetro equivalente, ejes mayor y menor, y un índice de circularidad calculado como $4\pi \times \text{área}/\text{perímetro}^2$, permitiendo así clasificar los gránulos según su tamaño y grado de esfericidad para el análisis estadístico posterior.

Como procedimiento complementario de verificación morfométrica, se realiza mediciones manuales mediante el software ImageJ sobre seis micrografías SEM, correspondientes a dos imágenes representativas de cada muestra (A1, B1 y C1). En cada micrografía se selecciona 20 gránulos individualizados, con contornos definidos y morfología relativamente homogénea, obteniendo un total de 120 mediciones. Las imágenes son calibradas individualmente mediante sus respectivas barras de escala y, a partir del área proyectada de cada gránulo, se calcula el diámetro circular equivalente mediante la expresión $d_{eq} = 2 \times \text{sqrt}(A/\text{pi})$ donde (A) corresponde al área expresada en μm^2. Este procedimiento permite obtener mediciones manuales de referencia para contrastar la plausibilidad dimensional de los resultados del análisis automatizado, considerando que la selección de gránulos homogéneos no representa necesariamente la distribución completa de tamaños de las muestras.

La Figura 4 resume el flujo de procesamiento implementado para la caracterización automática de los gránulos de almidón.

Figura 4

Flujo de trabajo para análisis de imágenes mediante Google Colab



Nota. Elaboración propia.

El algoritmo integra de manera secuencial las etapas de preprocesamiento, segmentación, extracción de características morfométricas y análisis estadístico, permitiendo transformar las micrografías SEM en una base de datos cuantitativa que facilita la determinación de la distribución del tamaño de partícula y otros parámetros morfológicos de interés. Para el análisis se consideran tres muestras comerciales de almidón de yuca, identificadas como A1, B1 y C1. Se analizan 14 micrografías SEM por muestra, obteniendo un conjunto de 42 imágenes. El procesamiento digital permite identificar y medir 2187 objetos en A1, 868 en B1 y 405 en C1, para un total de 3460 objetos segmentados.

Las diferencias en el número de objetos identificados deben ser interpretadas considerando las condiciones de adquisición de las micrografías y las características del procedimiento de segmentación. En consecuencia, estos conteos representan los objetos detectados en las imágenes analizadas y no constituyen, por sí solos, una medida de la concentración de gránulos en las muestras comerciales. La selección de estas muestras de almidón se debe su fácil adquisición, disponibilidad continua y representatividad como materias primas potencialmente utilizables en aplicaciones industriales. Esta selección permite realizar una evaluación comparativa inicial de sus características estructurales y químicas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), estableciendo una base experimental para la identificación de diferencias morfológicas y funcionales entre las muestras.

3. Resultados

Las condiciones de adquisición mostradas en la micrografía SEM tienen una influencia directa tanto en la calidad visual de la imagen TIFF como en la precisión de los algoritmos de segmentación

y análisis morfológico desarrollados en Google Colab. En realidad, una adecuada calibración y configuración del microscopio constituye el primer paso del procesamiento automatizado, ya que cualquier error introducido durante la adquisición se propagará posteriormente hacia las mediciones de tamaño de partícula, circularidad, distribución granulométrica y dispersión estadística.

En el caso de los gránulos de almidón de yuca, los parámetros reportados fueron: voltaje de aceleración de 20 kV, carga del filamento de 59,6 %, emisión de corriente de 89,2 µA, presión de vacío de $2{,}6 \times 10^{-3}$ Torr y magnificaciones comprendidas entre 100X y 5000X. Cada uno de estos parámetros cumple una función específica en la obtención de imágenes aptas para el análisis computacional.

La Tabla 2 presenta los parámetros empleados para el procesamiento digital de las micrografías SEM y la posterior caracterización morfológica de los gránulos de almidón. El estudio consideró tres muestras independientes, identificadas como A, B y C. Con el propósito de simplificar la presentación y la discusión de los resultados, las micrografías correspondientes a cada muestra se referencian mediante el identificador genérico “Muestra”, el cual representa cualquiera de las tres muestras analizadas según el contexto de la descripción.

Tabla 2

Datos característicos de imágenes SEM

Identificación	Magnifica-ción	Dimensión (píxeles)	Resolución (PPP)	Tipo de archivo	Barra de escala (µm)	Escala calculada (µm/pixel)
Muestra_01_displayed.tif	5000x	605 x 605	146 x 146	TIF	10	0,05291
Muestra_02_displayed.tif	2500x	605 x 605	146 x 146	TIF	10	0,4347
Muestra_03_displayed.tif	1000x	605 x 605	146 x 146	TIF	50	0,2645
Muestra_04_displayed.tif	750x	605 x 605	146 x 146	TIF	100	0,3521
Muestra_05_displayed.tif	500x	605 x 605	146 x 146	TIF	100	0,5291
Muestra_06_displayed.tif	250x	605 x 605	146 x 146	TIF	100	4,3478
Muestra_07_displayed.tif	100x	605 x 605	146 x 146	TIF	500	2,6455
Muestra_08_displayed.tif	5000x	605 x 605	146 x 146	TIF	10	0,05291
Muestra_09_displayed.tif	2500x	605 x 605	146 x 146	TIF	10	0,4347
Muestra_10_displayed.tif	1000x	605 x 605	146 x 146	TIF	50	0,2645
Muestra_11_displayed.tif	750x	605 x 605	146 x 146	TIF	100	0,3521
Muestra_12_displayed.tif	500x	605 x 605	146 x 146	TIF	100	0,5291
Muestra_13_displayed.tif	250x	605 x 605	146 x 146	TIF	100	4,3478
Muestra_14_displayed.tif	100x	605 x 605	146 x 146	TIF	500	2,6455

Nota. Elaboración propia.

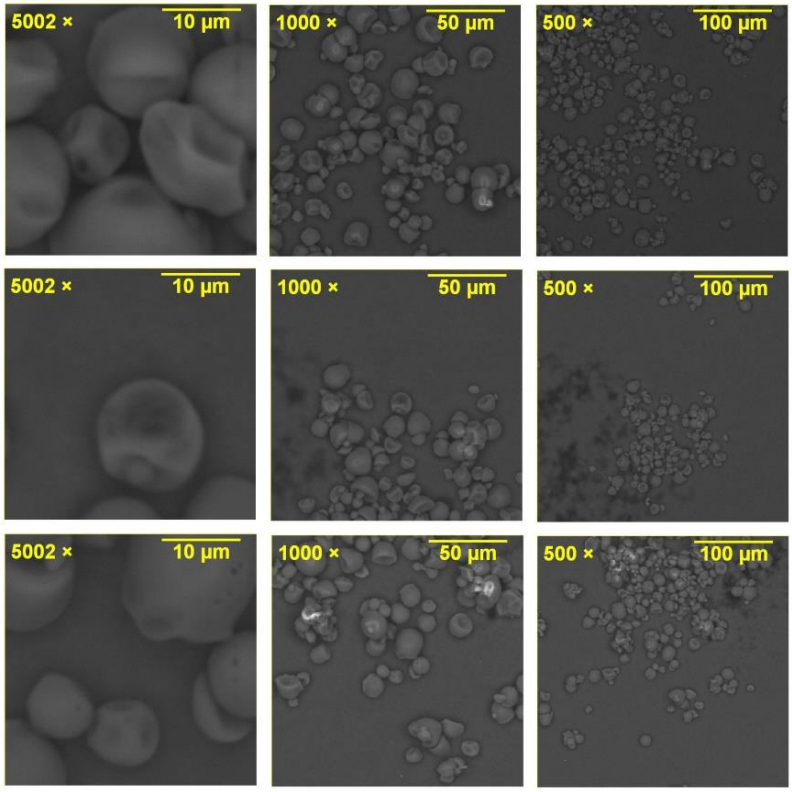
La Figura 5 presenta las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para las tres muestras de almidón evaluadas (A1, B1 y C1), organizadas por filas para

facilitar su comparación morfológica. Cada fila corresponde a una muestra independiente, mientras que las columnas muestran las imágenes adquiridas a magnificaciones de 5000×, 1000× y 500×, respectivamente.

Esta disposición permite analizar la morfología de los gránulos desde diferentes escalas de observación, proporcionando información tanto de la superficie y forma individual de las partículas como de su distribución espacial y grado de aglomeración. Las micrografías constituyen la base experimental para el posterior procesamiento automatizado mediante algoritmos desarrollados en Google Colab, orientados a la segmentación de partículas y a la determinación de parámetros morfológicos y granulométricos.

Figura 5

Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de las muestras de almidón de yuca A1, B1 y C1, adquiridas a magnificaciones de 500×, 1000× y 5000× para la evaluación de la morfología y distribución de los gránulos



Nota. Elaboración propia.

Con el propósito de facilitar la interpretación de las micrografías SEM y destacar la información aportada por cada nivel de magnificación, en esta sección se presenta una imagen representativa para cada aumento (500×, 1000× y 5000×), independientemente de la muestra de origen, ya que las características observadas corresponden a la función propia de cada escala de análisis.

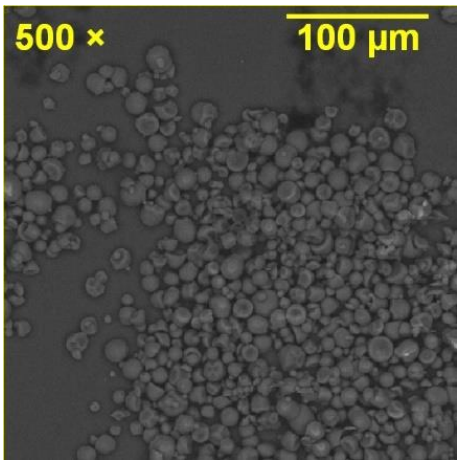
La micrografía adquirida a 500× de la Figura 6 permite evaluar la distribución espacial de los gránulos, su grado de dispersión y la presencia de aglomerados en un área amplia de observación. Esta imagen corresponde a la muestra de almidón tipo A1.

Por su parte, la imagen obtenida a 1000× de la Figura 7 proporciona un equilibrio entre el campo visual y el nivel de detalle, facilitando la identificación de la forma, el tamaño relativo y la homogeneidad morfológica de los gránulos individuales. Esta imagen corresponde a la muestra de almidón tipo B1.

Finalmente, la magnificación de 5000× de la Figura 8 permite examinar con mayor resolución la superficie de las partículas, identificando detalles como irregularidades, depresiones, poros o defectos superficiales que no son apreciables a menores aumentos. Esta imagen corresponde a la muestra de almidón tipo C1.

Figura 6

Micrografía SEM muestra de almidón, magnificación 500x, designación A1_05_displayed.tif (escala: 0,5291 µm/px)

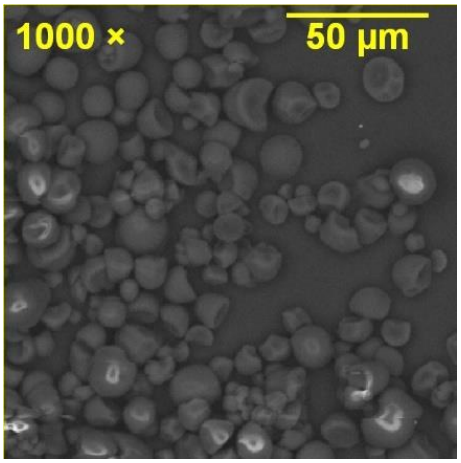


Nota. Elaboración propia.

En conjunto, las tres escalas de observación ofrecen una caracterización morfológica complementaria y constituyen la base para el procesamiento digital de imágenes y la extracción automatizada de parámetros granulométricos mediante los algoritmos desarrollados en Google Colab. En el análisis automatizado de imágenes SEM para la determinación del tamaño de gránulos de almidón, se desarrolla un flujo de trabajo en Python que integra bibliotecas especializadas. Se utilizaron os, zipfile y google.colab.files para la gestión y transferencia de archivos; re y pytesseract para la extracción de escalas mediante OCR; mientras que cv2, numpy, skimage (measure, morphology, segmentation y filters), scipy.ndimage y tifffile permiten el preprocesamiento, segmentación avanzada mediante watershed y el análisis morfológico preciso de las partículas.

Figura 7

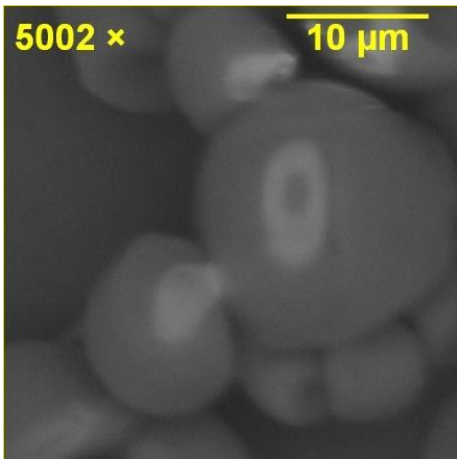
Micrografía SEM muestra de almidón, magnificación 1000x, designación B1_03_displayed.tif (escala: 0,2645 µm/px)



Nota. Elaboración propia.

Figura 8

Micrografía SEM muestra de almidón, magnificación 5000x, designación C1_01_displayed.tif (escala: 0,05291 µm/px)



Nota. Elaboración propia.

El procedimiento permite determinar el tamaño equivalente de cada gránulo y generar los correspondientes descriptores estadísticos. En la Tabla 3 se presentan los valores medios obtenidos posteriormente al análisis de la imagen, que son 6,99 ± 7,44; 7,09 ± 10,01 y 9,33 ± 14,30 para las muestras A1, B1 y C1, respectivamente. Con base en la comparación de las medias de las tres poblaciones analizadas, se obtuvo un coeficiente de variación intermuestra de aproximadamente 16,8 %. Asimismo, la similitud observada entre los valores medios de las muestras A1 y B1, junto con la consistencia del rango de tamaños máximos detectados en las tres muestras (≈69 µm), sugiere

que el algoritmo presenta un desempeño estable para la identificación y cuantificación de gránulos en imágenes SEM.

Tabla 3

Valores medios obtenidos

Muestra	n	Media (µm)	Std (µm)	CV (%)
A1	2187	6,99	7,44	106,5
B1	868	7,09	10,01	141,1
C1	405	9,33	14,30	153,3

Nota. Elaboración propia.

La dispersión de los diámetros equivalentes puede estar relacionada tanto con la heterogeneidad morfológica de los objetos analizados como con las condiciones de adquisición y procesamiento de las micrografías, particularmente la magnificación, la calibración de escala y los criterios de segmentación. Por ello, no es posible atribuir esta variabilidad exclusivamente a las características intrínsecas de las muestras.

Aunque el procesamiento automatizado de micrografías electrónicas mediante herramientas computacionales ha sido abordado previamente en la caracterización de partículas de almidón, como en el estudio de Sozzi et al. (2025), el aporte particular de esta investigación radica en la aplicación integrada de técnicas de segmentación y análisis morfométrico a tres muestras comerciales de almidón de yuca.

Mediante el procesamiento de 42 micrografías SEM, se obtuvo una base de datos cuantitativa de 3460 objetos segmentados, que permite describir y comparar las distribuciones de diámetro equivalente y la variabilidad morfológica de las muestras A1, B1 y C1. En este sentido, la contribución del estudio no consiste en desarrollar un nuevo algoritmo de segmentación, sino en implementar un procedimiento automatizado y documentado de caracterización morfológica aplicado a esta materia prima, cuyos resultados constituyen una referencia preliminar para investigaciones posteriores sobre su procesamiento y aprovechamiento en materiales biodegradables.

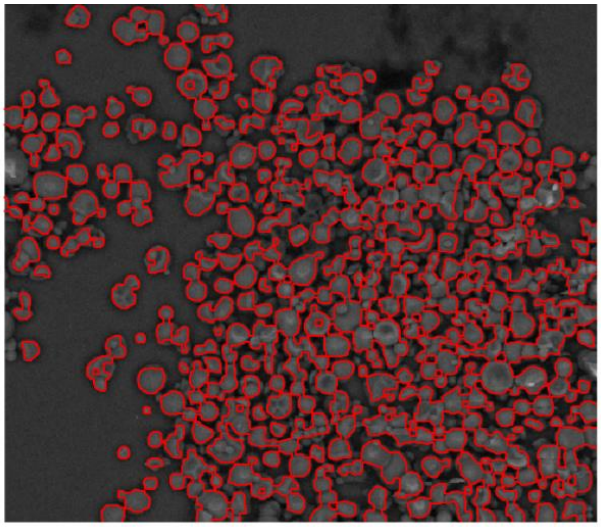
4. Discusión

El análisis descriptivo permite identificar diferencias en la amplitud, asimetría y dispersión de las distribuciones de tamaño granular de las muestras A1, B1 y C1. Según los indicadores calculados, A1 presenta la menor polidispersidad relativa, mientras que C1 registra la mayor heterogeneidad. Estas diferencias describen las poblaciones analizadas, pero no permiten establecer por sí solas sus causas ni anticipar el comportamiento tecnológico de cada materia prima. Un ejemplo del procesamiento de imágenes se muestra en la Figura 9, donde se observa el reconocimiento y la delimitación automática realizados por el programa al identificar patrones dentro de las

micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), de la muestra de almidón tipo A1.

Figura 9

Delimitación automática de los gránulos de almidón muestra A1_05_displayed.tiff (escala: 0,5291 µm/px)



Nota. Elaboración propia.

La muestra Tipo A1 presenta una distribución de frecuencias con un pico máximo en el rango de 20-30 µm, con una frecuencia de 80 unidades, lo que indica que la población mayoritaria de gránulos se concentra en este intervalo. Se observa una cola hacia tamaños superiores, con frecuencias decrecientes (30 unidades a 40-50 µm y 16 unidades a 60-70 µm), y una presencia de partículas muy finas (10-20 µm) con frecuencia de 20 unidades. La distribución sugiere una población relativamente homogénea, con un sesgo positivo leve hacia tamaños mayores, típico de almidones con morfología unimodal.

La muestra Tipo B1 presenta un comportamiento marcadamente diferente, con un pico máximo en el rango de 20-30 µm (frecuencia de 33 unidades) y un pico secundario pronunciado en el rango de 40-50 µm (frecuencia de 24 unidades). Este patrón bimodal sugiere la presencia de dos poblaciones granulométricas bien diferenciadas, posiblemente atribuible a la presencia de gránulos de tipo A1 (grandes) y tipo B1 (pequeños), característica de almidones de ciertos cereales como el trigo o la cebada probablemente. La presencia de gránulos en el rango de 10-20 µm (25 unidades) y 30-40 µm (30 unidades) refuerza la naturaleza polimodal de esta muestra.

La muestra Tipo C1 presenta un perfil granulométrico con un pico máximo en el rango de 20-30 µm (frecuencia de 40 unidades), con una distribución más amplia que se extiende desde 10 µm hasta 80 µm. Se observa una meseta entre 20 y 50 µm con frecuencias que oscilan entre 20 y 40 unidades, indicando una distribución más dispersa y menos definida que en las muestras A y B. Esta muestra presenta la mayor proporción de gránulos de tamaño superior a 60 µm (frecuencia de 6 unidades), sugiriendo una población con gránulos de mayor tamaño y mayor variabilidad morfológica.

El análisis automatizado de las micrografías permite caracterizar morfológicamente un total de 3460 gránulos de almidón pertenecientes a tres muestras comerciales de almidón de yuca. Los resultados evidenciaron diferencias en la distribución de tamaños entre proveedores. La muestra A1 presenta un tamaño promedio de 6,99 µm y una mediana de 5,41 µm, mientras que B1 muestra valores similares para la media (7,09 µm) pero una mediana inferior (4,43 µm). Por su parte, la muestra C1 registra la mayor media (9,33 µm), aunque con una mediana de 3,92 µm, indicando la presencia de una mayor proporción de partículas de pequeño tamaño acompañadas por algunos gránulos considerablemente más grandes.

Los elevados coeficientes de variación observados en las tres muestras (106,5; 141,1 y 153,3 % para A1, B1 y C1, respectivamente), son presentados en la Tabla 4, evidencian una marcada heterogeneidad en el tamaño de los gránulos. Esta tendencia se confirma al comparar los percentiles D10 y D90. La muestra A1 presenta una distribución relativamente más homogénea, con un índice de polidispersidad (D90/D10) de 8,49, mientras que B1 y C1 alcanzaron valores de 15,11 y 40,68, respectivamente, indicando un aumento progresivo en la amplitud de la distribución granulométrica.

Tabla 4

Resultados estadísticos, asimetría y heterogeneidad de partículas de almidón

Muestra	n	Media (µm)	Mediana (µm)	Std (µm)	CV (%)	D10 (µm)	D90 (µm)	PDI_D90_D10	asimetría	curtosis
A1	2187	6,9879	5,4063	7,4448	106,5390	1,4313	12,1463	8,4859	4,3573	27,0754
B1	868	7,0942	4,4348	10,0073	141,0640	0,8352	12,6187	15,1087	3,9362	17,9460
C1	405	9,3284	3,9241	14,2961	153,2535	0,7124	28,9815	40,6794	2,5145	6,0524

Nota. Elaboración propia.

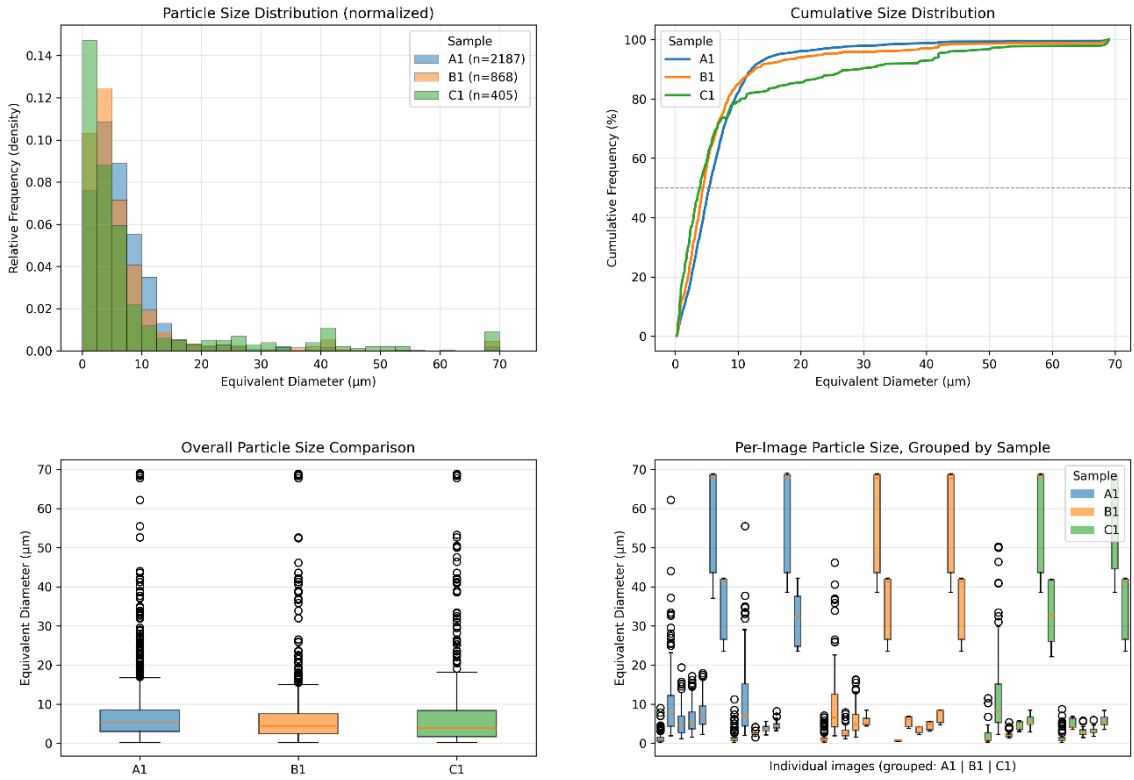
Las tres muestras exhibieron distribuciones asimétricas positivas, con coeficientes de 4,36; 3,94 y 2,51 para A1, B1 y C1, respectivamente, lo que refleja una concentración predominante de gránulos pequeños y una cola extendida hacia tamaños mayores. Asimismo, los elevados valores de curtosis, especialmente en A1 (27,08) y B1 (17,95), sugieren distribuciones leptocúrticas caracterizadas por una alta concentración de observaciones alrededor de los tamaños más frecuentes y la presencia de valores extremos. En contraste, la muestra C1 presenta una curtosis menor (6,05), indicando una distribución más dispersa.

Las muestras A1, B1 y C1 presentaron diferencias descriptivas en sus distribuciones de diámetros equivalentes. Sin embargo, la comparación exploratoria mediante Kruskal–Wallis, aplicada a las medianas obtenidas por micrografía, no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre las muestras ($H = 0,257$; $p = 0,879$). Este resultado debe interpretarse considerando la variabilidad entre campos de observación y las diferentes condiciones de magnificación de las imágenes SEM. En consecuencia, las diferencias observadas se describen como tendencias morfométricas, sin atribuirles significancia estadística ni establecer equivalencia entre las muestras.

La caracterización automatizada constituye, por tanto, una herramienta de comparación inicial de materias primas. Para determinar su utilidad como criterio de selección tecnológica es necesario contrastar los parámetros morfológicos con resultados experimentales de gelatinización, comportamiento reológico, extrusión y caracterización de los materiales obtenidos. El resumen de los datos estadísticos, obtenidos a partir del análisis de la distribución del tamaño de partícula, la frecuencia en cada micrografía y los parámetros de calidad de imagen, se presenta en la Figura 10.

Figura 10

Análisis del tamaño de partícula de los gránulos de almidón: comparación de las muestras A1, B1 y C1



Nota. Elaboración propia.

La verificación morfométrica complementaria mediante ImageJ comprende 120 gránulos seleccionados de seis micrografías SEM. Los diámetros equivalentes medios obtenidos son 12,90 µm para A1, 11,43 µm para B1 y 12,24 µm para C1. Estos valores corresponden a gránulos individualizados y morfológicamente homogéneos, por lo que no son directamente equivalentes a los promedios globales obtenidos mediante segmentación automatizada. La comparación permite disponer de una referencia dimensional independiente, aunque no constituye una evaluación de concordancia individual entre ambos procedimientos. Una distribución de tamaño de partícula más estrecha (como en la muestra A) facilitaría un comportamiento más predecible durante la gelatinización y la expansión, mientras que una distribución bimodal (como en la muestra B) podría inducir comportamientos heterogéneos debido a las diferentes cinéticas de gelatinización entre poblaciones de gránulos.

Desde una perspectiva de procesamiento, la literatura reconoce que las características del almidón pueden relacionarse con fenómenos como la hidratación, la gelatinización y las transformaciones estructurales durante la extrusión. Sin embargo, tales fenómenos también dependen de la composición, la humedad, los plastificantes y las condiciones termomecánicas (Chamorro et al., 2025). Por consiguiente, las diferencias morfológicas identificadas en este estudio no deben interpretarse como evidencia directa de variaciones en la expansión, la estabilidad o las propiedades mecánicas de futuras espumas.

En términos descriptivos, A1 presenta el menor índice de polidispersidad (D90/D10 = 8,49), mientras que C1 registra el valor más elevado (D90/D10 = 40,68). Estas diferencias caracterizan las distribuciones obtenidas mediante el procesamiento automatizado de las micrografías, pero no permiten inferir diferencias en gelatinización, expansión o propiedades mecánicas de materiales procesados. Este comportamiento ha sido descrito en sistemas espumados basados en almidón, donde las características iniciales del polvo afectan la densidad aparente, la expansión y las propiedades mecánicas de las espumas biodegradables (Martin Torrejon et al., 2023; Alban-Bolaños et al., 2024). Cabe mencionar que, en las etapas subsiguientes, se priorizará el procesamiento del material base y se documentarán los cambios significativos mediante bitácoras de seguimiento, correlacionándolos con las características de las muestras originales.

El uso de diferentes magnificaciones y factores de calibración puede limitar la comparabilidad directa de las mediciones obtenidas entre imágenes. Esta situación adquiere especial relevancia cuando la escala es determinada mediante reconocimiento óptico de caracteres (OCR) y detección automática de líneas, ya que pueden introducirse errores asociados al procesamiento digital de la imagen. Con el fin de asegurar la validez y trazabilidad de las mediciones, las escalas fueron verificadas mediante mediciones manuales independientes, fortaleciendo así la confiabilidad de los resultados y garantizando un análisis científicamente riguroso y responsable. La caracterización morfológica y la distribución de tamaños de los gránulos constituyen parámetros relevantes para el estudio de las propiedades funcionales del almidón.

Li et al. (2023) señalan que el tamaño granular se relaciona con características estructurales y fisicoquímicas que pueden influir en sus aplicaciones, mientras que Chamorro et al. (2025) destacan la importancia de la composición y las propiedades del almidón de yuca en su comportamiento durante el procesamiento. En este contexto, las diferencias descriptivas observadas entre las muestras A1, B1 y C1 aportan información preliminar para su caracterización, aunque no permiten establecer por sí solas diferencias en sus propiedades térmicas o reológicas.

Desde el punto de vista metodológico, Sozzi et al. (2025) demostraron la aplicabilidad del procesamiento automatizado de imágenes FESEM para extraer características morfológicas de partículas de almidón en muestras de arroz. Este antecedente respalda la pertinencia del análisis digital de imágenes como herramienta de caracterización. Por otra parte, Alban-Bolaños et al. (2024) investigaron la obtención de espumas biodegradables a partir de almidón termoplástico de yuca mediante extrusión, evidenciando la relevancia tecnológica de esta materia prima. En consecuencia, la información morfométrica obtenida en el presente estudio constituye una

referencia inicial para investigaciones posteriores que relacionen la distribución de tamaños de los gránulos con las condiciones de procesamiento y las propiedades de las espumas biodegradables.

5. Conclusiones

El análisis automatizado de 42 micrografías SEM permite obtener indicadores morfométricos de tres muestras comerciales de almidón de yuca (A1, B1 y C1), a partir de 3460 objetos segmentados. Los resultados muestran diferencias descriptivas en la dispersión, asimetría y polidispersidad de las distribuciones de diámetro equivalente. Sin embargo, la comparación exploratoria mediante Kruskal–Wallis no evidencia diferencias estadísticamente significativas entre las muestras ($p = 0,879$). Por tanto, los resultados constituyen una caracterización morfológica preliminar, cuya interpretación debe considerar las condiciones de adquisición de las imágenes, los criterios de segmentación y las limitaciones del muestreo.

La metodología implementada permite complementar las medidas convencionales de tendencia central con indicadores como los percentiles de distribución, el índice de polidispersidad, la asimetría y la curtosis. Este procedimiento proporciona una base de análisis para investigaciones posteriores orientadas a examinar posibles relaciones entre las características morfológicas del almidón y sus propiedades térmicas, reológicas y de procesamiento. Para ello, es necesario incorporar ensayos experimentales de gelatinización, extrusión y caracterización de las espumas obtenidas, incluyendo sus propiedades estructurales y mecánicas. El código empleado puede solicitarse al autor de correspondencia para su consulta y reproducción.

Referencias bibliográficas

Ai, Y., & Jane, J. (2015). Gelatinization and rheological properties of starch. Starch/Stärke, 67, 213–224. https://doi.org/10.1002/star.201400201

Ai, Y., & Jane, J. (2024). Understanding starch structure and functionality. En L. Nilsson (Ed.), Starch in food (3rd ed., pp. 55–77). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96102-8.00018-8

Alban-Bolaños, P., Ayala-Aponte, A. A., Villada-Castillo, H. S., Rodríguez-Herrera, R., Ávalos-Belmonte, F., & Solanilla-Duque, J. F. (2024). Biodegradable flexible foam: Novel material based on cassava TPS obtained by extrusion. Colloid and Polymer Science, 302(4), 597–608. https://doi.org/10.1007/s00396-023-05204-z

Alexander, J., & Contreras, C. (2017). Development of a biodegradable foam based on extruded esterified cassava starch [Tesis de pregrado, Universidad del Cauca]. Repositorio Institucional Universidad del Cauca. http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/9397

Amaraweera, S. M., Gunathilake, C., Gunawardene, O. H. P., Dassanayake, R. S., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., Rajapaksha, S. M., Manamperi, A., Gangoda, M., Manchanda, A., Fernando, C. A. N., Kulatunga, A. K., & Manipura, A. (2022). Preparation and characterization of dual-modified cassava starch-based biodegradable foams for sustainable packaging applications. ACS Omega, 7, 19579–19590. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01292

Barrera, G. N., Calderón-Domínguez, G., Chanona-Pérez, J., Gutiérrez-López, G. F., León, A. E., & Ribotta, P. D. (2013). Evaluation of the mechanical damage on wheat starch granules by SEM, ESEM, AFM and texture image analysis. Carbohydrate Polymers, 98, 1449–1457. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.056

Binou, P., Yanni, A. E., & Karathanos, V. T. (2022). Physical properties, sensory acceptance, postprandial glycemic response, and satiety of cereal-based foods enriched with legume flours: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 62, 2722–2740. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1858020

Chamorro, A. F., Palencia, M., & Lerma, T. A. (2025). Physicochemical characterization and properties of cassava starch: A review. Polymers, 17(12), 1663. https://doi.org/10.3390/polym17121663

Chen, C., Kulkarni, A., Narayan, R., & Catchmark, J. M. (2026). Biodegradable starch foams with tunable properties: A comparative study of microwave and extrusion processing. Journal of Polymers and the Environment, 34. https://doi.org/10.1007/s10924-026-03847-x

Chen, Z., Zhong, H., Chen, M., Gong, F., & Li, J. (2025). The fine structure of starch: A review. npj Science of Food, 9(1), 50. https://doi.org/10.1038/s41538-025-00414-x

Chung, C. I. (2019). Extrusion of polymers: Theory and practice. Carl Hanser Verlag.

De Smit, K., Wieme, T., Marien, Y. W., Van Steenberge, P. H. M., D'hooge, D. R., & Edeleva, M. (2022). Multi-scale reactive extrusion modelling approaches to design polymer synthesis, modification and mechanical recycling. Reaction Chemistry & Engineering, 7, 245–263. https://doi.org/10.1039/D1RE00556A

Engel, J. B., Ambrosi, A., & Tessaro, I. C. (2019). Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. Carbohydrate Polymers, 225, 115234. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115234

Figueiró, C. da S., Calcagno, C. I. W., & Santana, R. M. C. (2024). Starch foams and their additives: A brief review. Starch/Stärke, 76, 2300012. https://doi.org/10.1002/star.202300012

Götz, A., Senz, V., Schmidt, W., Huling, J., Grabow, N., & Illner, S. (2021). General image fiber tool: A concept for automated evaluation of fiber diameters in SEM images. Measurement, 177, 109265. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109265

Guo, L., Chen, H., Zhang, Y., Yan, S., Chen, X., & Gao, X. (2023). Starch granules and their size distribution in wheat: Biosynthesis, physicochemical properties and their effect on flour-based food systems. Computational and Structural Biotechnology Journal, 21, 4172–4186. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2023.08.019

Hyvärinen, M., Jabeen, R., & Kärki, T. (2020). The modelling of extrusion processes for polymers: A review. Polymers, 12(6), 1306. https://doi.org/10.3390/polym12061306

Jambeck, J. R., & Walker-Franklin, I. (2023). The impacts of plastics' life cycle. One Earth, 6(6), 600–606. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.05.015

Kim, H. S., & Huber, K. C. (2010). Physicochemical properties and amylopectin fine structures of A- and B-type granules of waxy and normal soft wheat starch. Journal of Cereal Science, 51, 256–264. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.11.015

Kumari, S., Rao, A., Kaur, M., & Dhania, G. (2023). Petroleum-based plastics versus bio-based plastics: A review. Nature Environment and Pollution Technology, 22(3), 1111–1124. https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i03.003

Li, M., Daygon, V. D., Solah, V., & Dhital, S. (2023). Starch granule size: Does it matter? Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63, 3683–3703. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1992607

Martin Torrejon, V., Song, H., Wu, B., Luo, G., & Song, J. (2023). Effect of starch type and pre-treatment on the properties of gelatin–starch foams produced by mechanical foaming. Polymers, 15(7), 1775.

McCrum, N. G., Buckley, C. P., & Bucknall, C. B. (2026). Principles of polymer engineering. Oxford University Press.

Meng, L., Liu, H., Yu, L., Duan, Q., Chen, L., Liu, F., Shao, Z., Shi, K., & Lin, X. (2019). How water acting as both blowing agent and plasticizer affect on starch-based foam. Industrial Crops and Products, 134, 43–49. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.056

Nabar, Y., Raquez, J. M., Dubois, P., & Narayan, R. (2005). Production of starch foams by twin-screw extrusion: Effect of maleated poly(butylene adipate-co-terephthalate) as a compatibilizer. Biomacromolecules, 6, 807–817. https://doi.org/10.1021/bm0494242

Rui-Heng, W., Li, X. Y., Li, Y. Y., Yang, G., Liu, Y. H., Zhang, J. J., Hu, Y. F., Li, Y. P., Huang, Y. B., & Liu, H. M. (2026). Development of a YOLOv10-based system for the starch granules recognition and size analysis of maize kernels. Biotechnology Bulletin, 42(6), 208–217. https://doi.org/10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2025-0957

Sirbu, E. E., Dinita, A., Tănase, M., Portoacă, A. I., Bondarev, A., Enascuta, C. E., & Calin, C. (2024). Influence of plasticizers concentration on thermal, mechanical, and physicochemical properties on starch films. Processes, 12, 2021. https://doi.org/10.3390/pr12092021

Soykeabkaew, N., Thanomsilp, C., & Suwantong, O. (2015). A review: Starch-based composite foams. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 78, 246–263. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.014

Sozzi, M., Cavallini, N., Chiadò, A., Gavoci, G., Cantaluppi, E., Haxhari, F., & Savorani, F. (2025). A new versatile algorithm to extract particle's features from FESEM images: Method evaluation and a case study on rice kernels. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 263. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105415

Sun, B., Qiu, H., Ding, X., Han, C., & Yi, Y. (2025). Effects of citric acid and polyamide-epichlorohydrin composite modification on the mechanical, hydrophobic, and thermal properties of starch/plant fiber foaming tableware materials. Industrial Crops and Products, 229, 121011. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121011

Teobaldi, A. G., Carrillo Parra, E. J., Barrera, G. N., & Ribotta, P. D. (2025). The properties of damaged starch granules: The relationship between granule structure and water–starch polymer interactions. Foods, 14, 21. https://doi.org/10.3390/foods14010021

Zhuang, Y., Saadatkhah, N., Morgani, M. S., Xu, T., Martin, C., Patience, G. S., & Ajji, A. (2023). Experimental methods in chemical engineering: Reactive extrusion. Canadian Journal of Chemical Engineering, 101, 59–77. https://doi.org/10.1002/cjce.24538