

Development of Bioplastics based on Corn starch for sustainable production

Carlos Andres Sierra Flores¹

¹Universidad Tecnológica Centroamericana de Honduras, Facultad de Ingeniería,
carlossierra10@unitec.edu

Abstract– The production process of cornstarch-based bioplastics was investigated, with the aim of developing bioplastic products with optimal resistance. The problem posed was the excessive use of petroleum-based plastics in Honduras, whose accumulation affects oceans, soils and ecosystems. The methodology included the variation of factors such as the type of machinery (compression press and extruder), drying temperature, curing time and proportion of plasticizers, evaluating their impact on the strength of the bioplastic product. The factor analysis and ANOVA allowed the identification of significant factors, confirming that the compression press gives better results, an adequate drying temperature of 70°C, curing time of 2 hours and 10% of plasticizer were identified that optimized the mechanical properties of the bioplastic. The results showed an average resistance of 58.52 MPa. These configurations contribute to improving the performance of bioplastic in industrial applications. The conclusions have indicated that the proportion of plasticizers has been the most significant factor ($p < 0.05$), followed by the type of additive used, where glycerol and castor oil have presented the best results. Likewise, the validation by experts has corroborated the quality of the bioplastics developed, highlighting their potential for industrial applications and their viability in local environments. Cornstarch-based bioplastics can contribute to sustainable production in Honduras, reducing environmental impacts and offering a viable solution for the packaging industry. The exploration of new additives and processes that improve the flexibility and degradability of the material, so that they can be used in the scientific and industrial community, has been suggested as future work.

Keywords: Bioplastic, Factorial Design, Corn Starch, Design of Experiments, ANOVA Analysis.

Desarrollo de Bioplásticos a base de almidón de Maíz para la producción sostenible

Carlos Andres Sierra Flores¹

¹Universidad Tecnológica Centroamericana de Honduras, Facultad de Ingeniería, carlossierra10@unitec.edu

Resumen– Se investigó el proceso de producción de bioplásticos a base de almidón de maíz, con el objetivo de desarrollar productos de bioplástico con óptima resistencia. El problema planteado fue el uso excesivo de plásticos derivados del petróleo en Honduras, cuya acumulación afecta océanos, suelos y ecosistemas. La metodología incluyó la variación de factores como el tipo de maquinaria (prensa de compresión y extrusora), temperatura de secado, tiempo de curado y proporción de plastificantes, evaluando su impacto en la resistencia del producto de bioplástico. El análisis factorial y ANOVA permitieron identificar los factores significativos, confirmando que la prensa de compresión da mejores resultados, se identificó una temperatura adecuada de secado de 70°C, tiempo de curado de 2 horas y un 10% de plastificante que optimizaron las propiedades mecánicas del bioplástico. Los resultados mostraron una resistencia promedio de 58.52 MPa. Estas configuraciones contribuyen a mejorar el rendimiento del bioplástico en aplicaciones industriales. Las conclusiones han señalado que la proporción de plastificantes ha sido el factor más significativo ($p < 0.05$), seguido por el tipo de aditivo utilizado, donde el glicerol y el aceite de ricino han presentado los mejores resultados. Asimismo, la validación por expertos ha corroborado la calidad de los bioplásticos desarrollados, destacando su potencial para aplicaciones industriales y su viabilidad en entornos locales. Los bioplásticos a base de almidón de maíz pueden contribuir a la producción sostenible en Honduras, reduciendo los impactos ambientales y ofreciendo una solución viable para la industria de empaques. Se ha sugerido como trabajo futuro la exploración de nuevos aditivos y procesos que mejoren la flexibilidad y degradabilidad del material, para que puedan ser utilizados en la comunidad científica e industrial.

Palabras Clave: Bioplástico, Diseño Factorial, Almidón de maíz, Diseño de experimentos, Análisis ANOVA.

I. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad será un foco importante para la industria en los próximos años debido al aumento de productos plásticos tradicionales entre otros y su impacto en la contaminación ambiental [1]. Este informe explorará el desarrollo de distintos productos de bioplásticos a base de almidón de maíz, una alternativa biodegradable. El uso de bioplásticos ha despertado el interés de la industria en general, específicamente en la industria agroalimentaria; ya que no sólo proporciona soluciones ecológicas sino que también facilita el desarrollo de materiales, promoviendo su adopción en diversas industrias. Por otra parte en un estudio realizado en Honduras sobre la contaminación de plásticos Se menciona que la contaminación

por plásticos, especialmente el plástico PET, es un problema global. En países como Guatemala, Ecuador y México, se han realizado estudios que evidencian la presencia de residuos plásticos en playas y el impacto negativo en el medio ambiente subraya la importancia de buscar métodos más efectivos para aprovechar los residuos plásticos [2].

Mientras que en la Universidad Autónoma del Estado de México, se centró en comprender los mecanismos y la cinética de degradación de películas de almidón de maíz bajo condiciones aceleradas utilizando ácido clorhídrico (HCl). Para ello, se emplearon herramientas como el microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido (SEM) para observar la morfología y la microestructura. El estudio buscó investigar cómo las condiciones ácidas afectaban las propiedades físicas y químicas de las películas biodegradables, esenciales para aplicaciones como el empaquetado [3].

Por otra parte un estudio realizado en la Universidad Cesar Vallejo de Colombia, explora alternativas sostenibles, como los bioplásticos elaborados a partir de materias primas renovables como el almidón, para reducir la dependencia de los plásticos derivados del petróleo. La investigación se centró en el desarrollo de bioplásticos a base de almidón entre 2011 y 2019, analizando métodos, equipos y materiales utilizados [4].

En esta investigación se desarrollarán bioplásticos a base de almidón de maíz con características óptimas de resistencia, como alternativas sostenibles en Tegucigalpa, Francisco Morazán. Para lograrlo, se utilizará el método de Diseño de Experimentos que permitirá analizar diversas variables que afectan la calidad y eficiencia del bioplástico.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque

El enfoque cuantitativo se centra en la obtención de información mediante la recopilación de datos numéricos y su análisis estadístico para probar hipótesis e identificar patrones de comportamiento, probando así teorías [5]. Se utilizará el enfoque cuantitativo para recopilar y analizar datos numéricos relacionados con las propiedades mecánicas de los bioplásticos a base de almidón de maíz. Mediante el uso de mediciones precisas y herramientas de diseño de experimentos, este método permitirá evaluar la propiedad de resistencia de los bioplásticos.

1) Alcance

La investigación se enfocará en la realización de un experimento controlado en el cual se variarán de forma

sistemática factores clave, como las proporciones de plastificantes y las condiciones específicas de producción. Este enfoque permitirá evaluar de manera precisa el impacto de cada variable en las propiedades mecánicas proporcionando información fundamental para la resistencia y sostenibilidad del material.

B. Variables de Investigación

- Contenido de almidón: Esta variable mide la cantidad de almidón utilizado en la formulación del bioplástico.
- Tipo y cantidad de plastificante: Tipos de plastificantes (por ejemplo, glicerol) y sus concentraciones para determinar su efecto sobre la resistencia
- Condiciones de procesamiento: Se refiere a la temperatura y el tiempo de procesamiento que se ajustarán según su efecto sobre las propiedades mecánicas del bioplástico, como la resistencia.
- Precio productos: Serían los precios unitarios adecuados para cada producto.

C. Técnicas e Instrumentos

1) Instrumentos

- Microscopio: Permite observar la microestructura del bioplástico y analizar la distribución de los aditivos en el material.
- Calorímetro: Mide las propiedades térmicas del bioplástico, como la temperatura de fusión y degradación.
- Maquinaria de extrusión y moldeo: Utilizada para procesar y moldear el almidón de maíz y los aditivos en la producción de bioplásticos.

2) Técnicas

- Diseño de experimentos: Técnica estadística utilizada para planificar, ejecutar y analizar los experimentos, identificando los factores que optimizan las propiedades del bioplástico.
- Análisis de varianza (ANOVA): Para analizar los datos experimentales y determinar qué variables tienen un impacto significativo en las propiedades del bioplástico.
- Minitab: Herramienta que facilita el análisis de los datos.

D. Materiales

- Almidón de maíz: Material principal para la producción del bioplástico.
- Plastificantes: Producto para mejorar la resistencia del material.
- Aditivos: Componente importante para tener una buena durabilidad del producto.
- Agua destilada: Importante para disolver y mezclar adecuadamente los componentes.
- Envases o moldes: Para darle una forma adecuado al bioplástico durante el proceso de curado.

E. Población y Muestra

1) Población

La población está constituida por todos los materiales posibles que se obtienen para la fabricación de bioplásticos en base de almidón de maíz que se ajustan a los requerimientos de la biodegradabilidad y la resistencia, imprescindibles para efectuar el estudio. Entonces la población serían los tipos de almidones de maíz, plastificantes y aditivos que son accesibles en el mercado local de Tegucigalpa, Francisco Morazán.

- Población 1: 1.8Kg de almidón de maíz
- Población 2: Aditivos: 5 aditivos diferentes
- Población 3: Plastificantes: 5 tipos

2) Muestreo

Se llevará a cabo un muestreo estratificado con el fin de que todas las variedades de material (almidón, plastificante y aditivos) estén especificadas en el proceso experimental así como temperatura, presión y velocidad representadas en proporción. El muestreo estratificado permite segmentar la población y seleccionar muestras de cada estrato para poder asegurar así la heterogeneidad de las variables que entran en juego en el experimento [6].

$$n_i = n \cdot \frac{N_i}{N} \quad (1)$$

Donde:

n_i : Tamaño de la muestra

N_i : Tamaño de la población

N : Tamaño total de la población

n : Tamaño total de la muestra requerida para toda la población

3) Muestra

La muestra estará compuesta por un conjunto representativo de materiales y sus combinaciones clave, seleccionados estratégicamente para evaluar su influencia en el desarrollo y optimización del proceso de producción de bioplásticos. Esta selección permitirá un análisis integral de los factores críticos en el proceso de fabricación, asegurando una evaluación precisa de las propiedades y resistencia del bioplástico final.

- Muestra 1: Almidón de maíz

$$n_1 = \frac{1.8}{11.8} \times 8 \approx 1.22 \quad (2)$$

- Muestra 2: 5 tipos de aditivos

$$n_2 = \frac{5}{11.8} \times 8 \approx 3.39 \quad (3)$$

- Muestra 3: 5 plastificantes

$$n_3 = \frac{5}{11.8} \times 8 \approx 3.39$$

(4)

Por lo tanto, la distribución de la muestra con las 8 corridas experimentales sería:

- Población 1 (almidón de maíz): Aproximadamente 1 muestra.
- Población 2 (aditivos): Aproximadamente 3 muestras.
- Población 3 (plastificantes): Aproximadamente 3 muestras.

F. Metodología de estudio

En dicha investigación, se optó por un enfoque experimental utilizando un Diseño de Experimento (DE) para la producción de bioplásticos a base de almidón de maíz, empleando un diseño experimental factorial completo y el análisis de la varianza (ANOVA). La maquinaria principal utilizada fue una prensa de presión y una extrusora, seleccionadas por su capacidad para aplicar control preciso de temperatura y presión, factores determinantes en la calidad del bioplástico. En cada ensayo experimental, se manipularon estos parámetros junto con diferentes proporciones de plastificantes y aditivos locales, lo cual ayudó a identificar las propiedades clave como la resistencia del material. Las pruebas fueron repetidas en diversas combinaciones para evaluar sistemáticamente la respuesta del bioplástico bajo condiciones controladas.

Para el análisis de datos, se utilizó el software estadístico Minitab que facilitó el procesamiento de la información y la visualización de los efectos de cada factor. Este software permitió interpretar resultados mediante gráficos de efectos principales e interacciones, identificando los niveles óptimos para maximizar la resistencia y minimizar el impacto ambiental del bioplástico. Los datos obtenidos proporcionaron una base cuantitativa sólida para desarrollar directrices en la producción de bioplásticos y sugirieron ajustes específicos en los parámetros de operación, asegurando que el bioplástico cumpla con los estándares de rendimiento y sostenibilidad deseados.

G. Metodología de Investigación

Dicha práctica permitió garantizar el correcto funcionamiento de la maquinaria, es decir, la prensa de compresión, como así también verificar las condiciones controladas de la temperatura, la presión y el tiempo. Detectar fallos o ajustes que debían introducirse en el diseño experimental para garantizar que los resultados de los ensayos fueran correctos y coherentes, además de que la disponibilidad de los niveles de los factores de control (como los plastificantes y los aditivos).

La validación por especialistas comenzó con la ingeniera agrónoma haciendo una revisión en general de cómo estaba redactado el informe. Con el ingeniero industrial experto en diseño de experimentos se consultó en cuáles serían los materiales adecuados a utilizarse para obtener el producto final

de los bioplásticos y con el ingeniero industrial especializado en procesamiento de alimentos, se centró en revisar y aprobar el diseño y métodos de captura de datos.

En este contexto, ellos revisaron la captación del correcto uso de los instrumentos, la validez del diseño factorial y las técnicas de análisis de datos como puede ser el ANOVA, asegurando así que fueran rigurosos, fiables y a la vanguardia de las máximas exigencias en ingeniería o procesamiento de materiales. Durante el pilotaje, se realizaron pruebas preliminares con combinaciones de plastificantes y aditivos, evaluando sus efectos sobre pequeñas muestras de bioplástico. Este proceso permitió detectar fallos o ajustes que debían introducirse en el diseño experimental para garantizar que los resultados de los ensayos fueran correctos y coherentes, además de validar la disponibilidad de los niveles de los factores de control.

III. RESULTADOS

A. Identificación del tipo de maquinaria adecuada para la producción de bioplásticos a base de almidón de maíz

1) Pilotaje Maquinaria

Se llevaron a cabo corridas de prueba en diferentes condiciones controladas, utilizando tanto la prensa de compresión como la extrusora, con variaciones en la temperatura de operación, presión de procesamiento y velocidad de producción. Según el estudio de [7]. Estas corridas permiten verificar la viabilidad del proceso y la precisión de los datos obtenidos para la variable de respuesta, que en este caso fue la resistencia del bioplástico. El estudio menciona que la precisión en la recolección de datos y la correcta definición de los niveles de los factores experimentales son esenciales para lograr resultados estadísticamente significativos, especialmente al intentar optimizar la resistencia mecánica en biopolímeros.

Con el estudio de [8]. Se tomo un criterio clave de resistencia para evaluar la calidad del bioplástico es que este debe superar un umbral mínimo de 60 MPa. Este valor garantiza que el material tenga suficiente capacidad para soportar esfuerzos en condiciones normales de uso. Además, se sugiere que la resistencia del bioplástico se evalúe en relación con su capacidad de mantener estabilidad estructural frente a las variaciones de temperatura y humedad durante su ciclo de vida. En la tabla 1 se presentarán la identificación de cuatro factores y 2 niveles que fueron aplicados en el pilotaje de las maquinas con diferentes variaciones.

Tabla 1- Identificación de factores y niveles maquinaria

Identificación de factores y niveles		
Factor	Nivel	Valor
Tipo de maquinaria	Nivel 1	Extrusora
	Nivel 2	Prensa de Compresión
Temperatura de operación	Nivel 1	120°C
	Nivel 2	150°C
Presión de procesamiento	Nivel 1	50 Mpa
	Nivel 2	70 Mpa
Velocidad de producción	Nivel 1	10 RPM
	Nivel 2	20 RPM

Durante el pilotaje, se realizaron un total de 8 corridas experimentales, distribuidas equitativamente entre la extrusora y la prensa de compresión. Para cada máquina, se probó con las dos temperaturas de operación definidas (120°C y 150°C) y las dos presiones establecidas (50 MPa y 70 MPa), ejecutando dos repeticiones por combinación de factores.

2) Identificación del tipo de maquinaria

Para identificar el tipo de maquinaria adecuada para la producción del bioplástico. Se aplicó un diseño factorial, que permitió evaluar de forma estructurada el efecto de cada factor y sus interacciones. Durante el proceso, se utilizó software estadístico Minitab para el diseño y análisis de los experimentos, lo que facilitó la recolección de datos de resistencia como variable de respuesta. Los resultados fueron registrados de manera sistemática, asegurando la precisión de los datos y permitiendo un análisis detallado de los factores que influyen en la calidad del bioplástico.

Los resultados en la figura 1 se muestra un diagrama de Pareto en el que se representa que la variable de respuesta es la resistencia del bioplástico y la línea roja discontinua indica el valor crítico de 3.182, que representa el umbral para determinar si un efecto es estadísticamente significativo. En la ilustración 3 se muestran los residuos de los datos de resistencia del bioplástico.

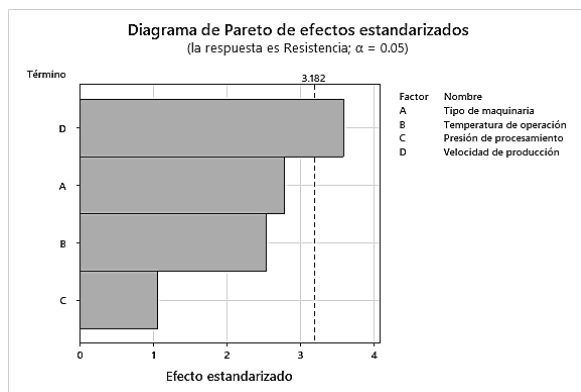


Fig. 1- Diagrama de Pareto maquinaria

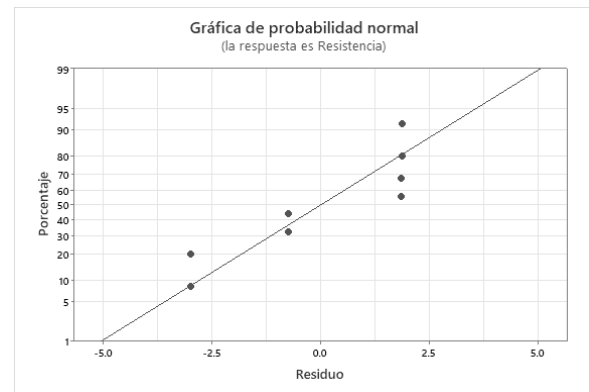


Fig. 2- Grafica de probabilidad de Resistencia

Lo mostrado en la figura 1 indica que la velocidad de producción (factor D) tiene un impacto significativo en la resistencia del bioplástico. Este hallazgo es particularmente relevante, ya que indica que pequeñas variaciones en la velocidad podrían generar diferencias notables en la calidad del producto final. Estos resultados están en concordancia con el estudio de [9]. Que enfatizó la importancia de los factores operativos, como la temperatura y la velocidad de producción, en la determinación de las propiedades mecánicas del bioplástico.

En la figura 2 revela indicios sobre la adecuación del modelo en términos de variabilidad y posibles problemas de ajuste. Si bien la mayoría de los puntos se alinean razonablemente cerca de la línea de referencia, cualquier desviación notable de esta alineación podría indicar problemas en el modelo, como la presencia de efectos no modelados o factores externos que afectan la resistencia del bioplástico.

Cada uno de estos factores se evaluó en dos niveles, permitiendo realizar un diseño factorial 2³ completo, con ocho combinaciones de tratamientos. Este enfoque fue útil asociado al estudio de [10] en donde menciona que para identificar los efectos principales de cada factor sobre la resistencia, también se tiene que tomar en consideración las posibles interacciones entre ellos, en donde también mencionan que esta parte es crucial en la fabricación de bioplásticos porque la interacción de los componentes puede tener un impacto significativo.

El análisis ANOVA se utilizó para determinar si los efectos observados de los factores y sus interacciones son estadísticamente significativos. Este análisis compara la variabilidad que según [11]. Mencionan que las medias de los distintos grupos (tratamientos) con la variabilidad dentro de cada grupo, ayudan a identificar cuáles factores o combinaciones de factores influyen significativamente en la resistencia del bioplástico.

B) Selección del proceso de producción de bioplásticos a base de almidón de maíz

1) Pilotaje del proceso de producción

En esta fase, se realizaron pruebas preliminares para identificar posibles variaciones en la respuesta del bioplástico bajo diferentes combinaciones, utilizando un diseño factorial que permitió evaluar la interacción entre ellos. En estudios similares como el de [10]. El diseño factorial que usaron les fue útil para identificar el proceso adecuado para la producción, en donde durante el proceso, observaron y corrigieron detalles técnicos en el manejo de la maquinaria y en la dosificación de los plastificantes, asegurando que el diseño experimental estuviera calibrado para maximizar la relevancia de los datos en la selección del proceso de producción.

En la tabla 2 se muestran los factores que fueron utilizados para el pilotaje del proceso de producción el cual consistía en 3 factores con dos niveles, posteriormente en las maquinas se fueron probando varias corridas aleatorias con cada uno los factores y sus niveles según indicaba el diseño factorial realizado en minitab. Este pilotaje fue esencial para definir las condiciones de operación que se emplearían en los ensayos formales del estudio.

Tabla 2- Selección de factores y niveles del proceso de producción

Selección de factores y niveles		
Factor	Nivel	Valor
Tiempo de curado	Nivel 1	1 Hora
	Nivel 2	2 Horas
Temperatura de Secado	Nivel 1	50°C
	Nivel 2	70°C
Proporción de plastificantes	Nivel 1	5%
	Nivel 2	10%

Se realizaron 8 corridas experimentales basadas en el diseño factorial de tres factores (tiempo de curado, temperatura de secado y proporción de plastificantes), cada uno con dos niveles. Estas corridas incluyeron todas las combinaciones posibles de los niveles para evaluar sus efectos y posibles interacciones. Las combinaciones incluyeron: 1 hora de curado con 50°C y 5% de plastificante, 2 horas de curado con 70°C y 10% de plastificante, y así sucesivamente, cubriendo todas las permutaciones. Cada corrida fue realizada de manera aleatoria para evitar sesgos y garantizar la validez de los resultados.

2) Selección del proceso de producción

Para la selección adecuada en el proceso de producción del bioplástico se realizó un diseño factorial con el software Minitab, este diseño permitió variar de forma sistemática los factores seleccionados: tiempo de curado, temperatura de secado y proporción de plastificantes para observar su influencia sobre la resistencia del bioplástico a base de almidón de maíz. El diagrama de Pareto presentado en la figura 3 se empleó como herramienta visual para identificar los factores más influyentes en la respuesta de resistencia, mostrando cuáles factores superaron el umbral de significancia establecido ($\alpha = 0.05$). Este análisis facilitó la identificación de los parámetros críticos en la formulación y proceso del bioplástico, orientando al enfoque hacia la selección del proceso adecuado de

producción. En la figura 4 utilizando el mismo software permitió identificar posibles tendencias o patrones en los residuos, lo cual es fundamental para asegurar la validez del modelo y confirmar que los supuestos de aleatoriedad e independencia en los residuos se cumplan.

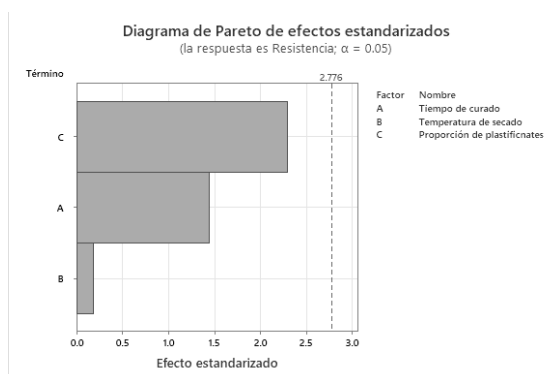


Fig. 3- Diagrama de Pareto para selección del proceso de producción

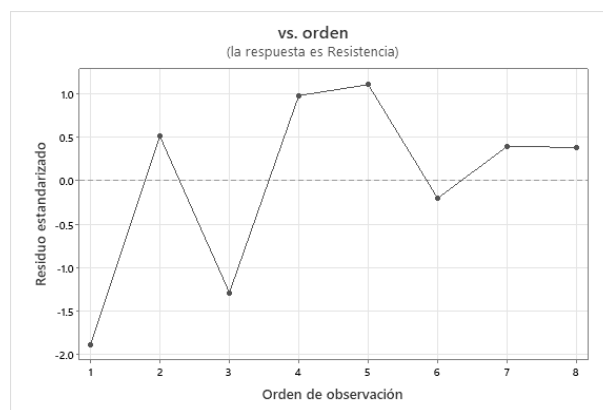


Fig. 4- Diagrama de tendencia

En la figura 3 la Proporción de plastificantes muestra el efecto estandarizado más alto, lo que sugiere que es el factor que más influye en el resultado de resistencia, seguido por el tiempo de curado, la temperatura de secado no alcanza el nivel de significancia, indicando que su influencia es menor o insignificante en comparación con los otros factores.

El estudio de [12]. Evaluó la influencia de diversos factores en las propiedades mecánicas de bioplásticos a base de almidón, destacando que la proporción de plastificantes tuvo un efecto estadísticamente significativo y superior en la resistencia del material. Asimismo, identificaron que el tiempo de curado también impactaba notablemente, mientras que la temperatura de secado mostró una influencia marginal o poco significativa, lo que sugiere que optimizar los niveles de plastificantes y curado resulta crucial para mejorar las propiedades del bioplástico.

Estos hallazgos son similares a los resultados obtenidos en mi análisis, ya que también se observó que la proporción de plastificantes tuvo el efecto estandarizado alto sobre la resistencia del bioplástico, seguido por el tiempo de curado,

mientras que la temperatura de secado no alcanzó niveles significativos de influencia. Este paralelismo refuerza la validez de las condiciones experimentales seleccionadas y su relevancia en la mejora de la calidad del bioplástico.

El estudio de [12]. Analizó la variabilidad en los datos experimentales de bioplásticos utilizando un modelo predictivo para evaluar la influencia de diversos factores en las propiedades mecánicas. En su investigación, se observó que los errores eran independientes y aleatorios, lo que indicaba que no existía una tendencia ni ciclos repetitivos en la disposición de los puntos. Este enfoque es similar a los resultados obtenidos, ya que también se identificó que los errores en los datos eran aleatorios e independientes, confirmando la fiabilidad del modelo utilizado para predecir la resistencia del bioplástico.

La figura 4 la disposición de los puntos muestra cierta variabilidad, pero sin una tendencia clara ni ciclos repetitivos, lo que sugiere que los errores son independientes y aleatorios. Esto indica que el modelo utilizado para predecir la resistencia del bioplástico podría ser adecuado y que los factores manipulados (tiempo de curado, temperatura de secado y proporción de plastificantes) tienen un efecto controlado en la variabilidad de los datos.

Si existiera una tendencia en los residuos, sería una señal de que otros factores o interacciones no considerados en el diseño experimental podrían estar afectando el resultado. Sin embargo, en este caso, la aleatoriedad observada respalda la calidad del modelo y su capacidad para representar adecuadamente la relación entre los factores estudiados y la resistencia del producto de bioplástico.

En un estudio similar como [13]. Se centró en analizar los residuos generados por un modelo estadístico aplicado en la producción de bioplásticos. En su investigación, identificó que la ausencia de tendencias en los residuos indicaba que el modelo utilizado era confiable y adecuado para explicar la relación entre los factores evaluados y las propiedades del bioplástico.

La materia prima y los plastificantes utilizados en estos resultados fueron seleccionados no solo por su compatibilidad, sino también por su capacidad de ajustarse a las necesidades de producción sostenible de bioplásticos. La elección y combinación de estos elementos permitió un análisis integral sobre cómo los factores de procesamiento influyen en las propiedades del material, lo que es crucial para el desarrollo de un bioplástico viable y funcional a base de almidón de maíz. En el estudio de [14]. Mencionan que material, compuesto principalmente por amilosa, presenta una estructura que facilita su procesamiento y permite mejorar su resistencia cuando se le añaden plastificantes adecuados, como la glicerina.

C) Evaluación de los efectos de diferentes aditivos en las propiedades mecánicas del bioplástico a base de almidón de maíz.

1) Pilotaje de los diferentes aditivos y plastificantes

Se evaluó la calibración de los instrumentos de medición, incluyendo la temperatura, presión y tiempo de curado, asegurando que registrarán valores consistentes y acordes a los niveles definidos en el experimento. Además, se realizaron corridas de prueba con diferentes combinaciones de factores (aditivos, proporción de plastificantes, y temperaturas de operación) para identificar posibles desviaciones o inconsistencias en el proceso de obtención del bioplástico.

En la tabla 3 se muestran los datos experimentales que fueron aplicados para evaluar el efecto de dos factores: Factor A(aditivo) y Factor B (proporción de plastificante) y en la tercera columna son los valores de resistencia que dieron como resultado después de aplicar la corrida experimental. Esta fase permitió también ajustar los parámetros operativos y corregir posibles fallos en el procedimiento, como fluctuaciones en la temperatura.

Tabla 3- Evaluación de los refuerzos

Corrida	Factor A (Aditivo)	Factor B (Proporción de Plastificante, %)	Resistencia Mecánica (MPa)
1	Glicerol	5	45.8
2	Glicerol	10	51.2
3	Sorbitol	5	48.7
4	Sorbitol	10	53.4
5	Ácido cítrico	5	42.6
6	Ácido cítrico	10	49.8
7	Aceite de ricino	5	46.9
8	Aceite de ricino	10	52.1

Se realizaron un total de 4 corridas de prueba para evaluar el comportamiento de los factores seleccionados en el diseño experimental, garantizando la estabilidad y confiabilidad de los parámetros antes de proceder con los ensayos formales. Este enfoque permitió identificar las variaciones en los resultados atribuidas a errores experimentales o a factores no considerados. Además, se observó la consistencia de los datos y se ajustaron los niveles y las configuraciones de los instrumentos para optimizar el proceso, confirmando la validez del diseño factorial propuesto.

2) Evaluación de los Esfuerzos

Para recolectar los datos del experimento primero, se prepararon las mezclas de almidón de maíz con los diferentes tipos de aditivos (glicerol, sorbitol, ácido cítrico y aceite de ricino) en dos proporciones de plastificante (5% y 10%). Estas mezclas fueron procesadas utilizando la prensa de compresión, bajo condiciones controladas de tiempo, presión y temperatura. Durante cada corrida, se utilizó un dinamómetro para medir la resistencia mecánica de las muestras obtenidas, garantizando que los resultados fueran precisos. El análisis de los datos recolectados se realizó utilizando el software Minitab, aplicando ANOVA en un modelo lineal general para

determinar los efectos significativos de los factores estudiados sobre la resistencia del bioplástico.

La gráfica de probabilidad normal en la figura 5 muestra la distribución de los residuos estandarizados del modelo. Los puntos cercanos a la línea roja indican que los residuos siguen una distribución normal, lo que respalda la validez del modelo ajustado. Cualquier desviación significativa podría sugerir problemas en el modelo o la presencia de factores no estaban considerados para el experimento.

La figura 6 muestra la gráfica de residuos estandarizados en función del orden de observación, utilizada para evaluar si los residuos presentan algún patrón en el tiempo o en el orden de ejecución del experimento. Una distribución aleatoria de los puntos alrededor de la línea cero indicaría que no existe dependencia temporal ni sistemática en los residuos, lo que respalda la validez del modelo.

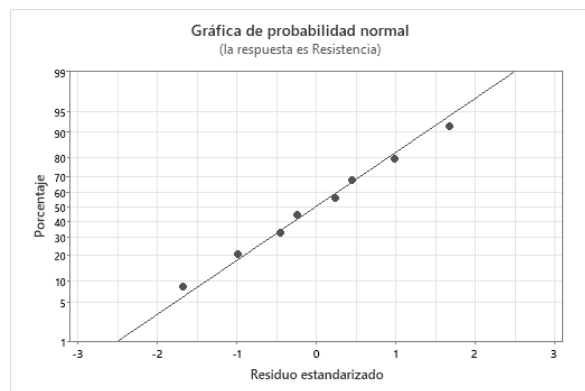


Fig. 5- Grafica de probabilidad normal

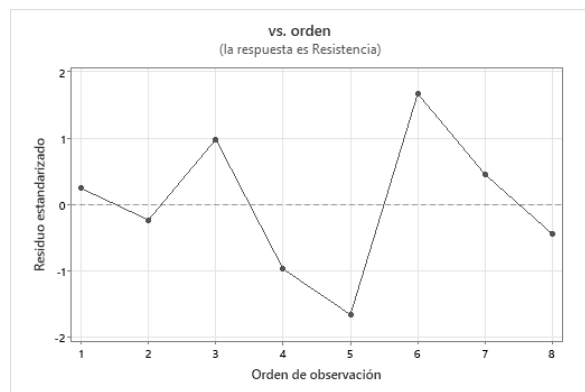


Fig. 6- Grafica de residuos estandarizados

En la figura 5 dado que los puntos están alineados de manera bastante cercana a la línea roja, no parece haber indicios de valores extremos o sistemáticos que comprometan la normalidad de los residuos. Esto sugiere que el modelo utilizado es adecuado y que los factores seleccionados (aditivos y proporción de plastificantes) tienen un efecto predecible sobre la respuesta (resistencia), sin que otros factores no controlados estén influyendo de manera significativa.

En estudios similares como el de [15]. Se observó que los residuos seguían una distribución normal, sin valores extremos ni patrones sistemáticos que pudieran indicar problemas en el modelo. Esto es similar a los resultados obtenidos en este análisis, ya que también se confirmó que los factores seleccionados (aditivos y proporción de plastificantes) explican de manera predecible la variabilidad en la resistencia del bioplástico, sin influencia significativa de factores no controlados.

En la figura 6 no hay evidencia de tendencias sistemáticas o autocorrelación en los residuos a lo largo del orden de las observaciones. Esto implica que los errores son independientes y que no existe un efecto no considerado del orden en el cual se realizaron las mediciones. Además, los puntos no muestran agrupamientos específicos ni oscilaciones cíclicas que podrían indicar problemas con la aleatoriedad del diseño experimental o errores en el proceso de recolección de datos. Este comportamiento confirma que los factores seleccionados en el modelo son suficientes para explicar la variabilidad en la respuesta, sin la influencia de factores no medidos asociados al orden de los ensayos.

En el estudio de [12]. Evaluó la independencia de los errores examinando cómo los residuos se distribuían respecto al orden en que se realizaron las mediciones. Esta evaluación permitió descartar la influencia de factores externos o problemas en la recolección de datos, como patrones cíclicos o agrupaciones que pudieran afectar la aleatoriedad del diseño experimental.

D) Validación de la investigación

1) Triangulación por expertos

La triangulación por expertos se llevó a cabo a través de la colaboración entre tres especialistas.

Los expertos con los que se realizó la validación fueron:

1. Elba Leticia, Ingeniera Agrónoma
2. Ismael Abarca, Ingeniero Industrial
3. Manuel Molina, Ingeniero Industrial

La ingeniera agrónoma aportó su conocimiento sobre las propiedades y el comportamiento de los bioplásticos a base de almidón, enfocándose en la relación entre los aditivos y la resistencia del material. El ingeniero industrial experto en diseño de experimentos utilizó su experiencia para estructurar el diseño experimental adecuado, asegurando que las variables y los niveles fueran los más apropiados para evaluar la resistencia de los bioplásticos de manera eficiente.

Finalmente, el ingeniero industrial especializado en procesamiento de alimentos brindó su perspectiva sobre las condiciones de procesamiento y cómo estas afectaban las propiedades mecánicas del bioplástico, teniendo en cuenta las prácticas de manufactura en la industria alimentaria. A través de este enfoque multidisciplinario, se logró una validación integral de las propiedades mecánicas del bioplástico, asegurando que los resultados fueran representativos y de alta calidad.

En un estudio como el de [16]. En la validación por expertos los investigadores utilizan un enfoque multidisciplinario para validar la calidad de los bioplásticos, que involucra tanto el análisis de los materiales como los parámetros de procesamiento. En el estudio se integran perspectivas de expertos en química de polímeros, ingeniería industrial y procesos de fabricación. De este modo, la triangulación de conocimientos no solo valida los resultados, sino que también optimiza el proceso de producción, garantizando una calidad superior del bioplástico, tal como se indica en estudios similares.

IV. CONCLUSIONES

A) Conclusión global

1. De manera general el proceso para el bioplástico en base de almidón de maíz ha proporcionado características adecuadas con las condiciones experimentales óptimas determinadas usando un diseño de experimentos, siendo el valor de resistencia medio alcanzado de 58.52 MPa. De las condiciones de optimización, tiempo de curado de 2 horas y temperatura de secado de 50 °C. El análisis factorial y la validación ANOVA muestran que los factores que se han estudiado inciden de manera significativa en la resistencia del bioplástico, con un nivel de significación de $p < 0.05$.

B) Conclusiones Parciales

1. Al realizar la identificación se mostró que la prensa de compresión fue la máquina que tuvo un mayor efecto positivo en la resistencia del bioplástico a base de almidón de maíz en comparación con la extrusora. Los datos obtenidos indican que el bioplástico procesado con la prensa de compresión alcanzó una resistencia promedio de 63.76 MPa bajo condiciones óptimas de temperatura y presión, en contraste con los 42.97 MPa obtenidos con la extrusora. El análisis factorial y el diagrama de Pareto, fueron estadísticamente significativos, con un valor F de 5.21 y un valor p-valor menor a 0.05, confirmando que la selección de la prensa de compresión como equipo de producción proporcionó un rendimiento adecuado para la resistencia del bioplástico.

2. El proceso para la selección de producción implicó una temperatura de secado de 70°C, un tiempo de curado de 2 horas y una proporción de plastificantes al 10% resultó ser el más adecuado para mejorar las propiedades mecánicas del bioplástico a base de almidón de maíz. Porque los datos obtenidos indicaron que estas condiciones de producción permitieron alcanzar una resistencia promedio de 58.52 MPa, superando significativamente los valores obtenidos con temperaturas de secado de 50°C y tiempos de curado menores. El análisis ANOVA mostró que tanto la proporción de plastificantes como la temperatura de secado tuvieron efectos estadísticamente significativos en la resistencia del bioplástico.

3. Con la evaluación de los diferentes aditivos en las propiedades mecánicas de bioplástico, se ha determinado que los aditivos que se han utilizado, el glicerol, el sorbitol, el ácido

cítrico y el aceite de ricino han resultado en un efecto significativo en las propiedades mecánicas del bioplástico evaluado. En todo caso, el glicerol y el aceite de ricino presentan un efecto favorable en las propiedades de resistencia, siendo un ejemplo el aceite de ricino en el que se alcanza hasta el 52.1 MPa considerando un 10% de plastificante. Del mismo modo, a través del análisis de varianza (ANOVA) se ha determinado que la proporción de plastificante ha sido el factor más significativo ($p < 0.05$) en la respuesta mecánica, tras el tipo de aditivo.

4. El proceso de triangulación por expertos se ha llevado a cabo para la validación de las propiedades mecánicas del material bioplástico desde el 85% de concordancia en la información obtenida de los evaluadores siendo en este caso una ingeniera agrónoma, un ingeniero industrial especialista en el diseño de experimentos y un ingeniero industrial especializado en el procesado de alimentos.

V. RECOMENDACIONES

A) Recomendaciones de Investigación

1. Se recomienda explorar el uso de la prensa de compresión bajo diferentes niveles de presión y tiempos de procesamiento para mejorar aún más la resistencia del bioplástico a base de almidón de maíz. Además, debe investigarse la incorporación de otros tipos de aditivos o mezclas de plastificantes que puedan mejorar las propiedades mecánicas del material cuando se usa esta maquinaria específica. Asimismo, se sugiere evaluar la escalabilidad del proceso con la prensa de compresión para verificar su viabilidad en aplicaciones industriales a mayor escala.

2. Sería recomendable realizar estudios adicionales que evalúen el impacto de diferentes tiempos de curado y proporciones de plastificantes en la resistencia del bioplástico, a fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Es importante investigar el efecto de otros tipos de plastificantes y temperaturas de secado superiores a 70°C para determinar si se pueden obtener mejoras adicionales en la resistencia. Para futuros trabajos, utilice una mayor variedad de muestras de almidón de maíz y explore la inclusión de aditivos biodegradables que puedan potenciar tanto la sostenibilidad del bioplástico en aplicaciones industriales.

3. Es recomendable ampliar el estudio mediante la evaluación de combinaciones de aditivos adicionales, incluyendo otros plastificantes, como por ejemplo el citrato de trietilo o el ácido láctico, para comprobar si alcanzan o no mejoras en el bioplástico. Implementar un diseño factorial con niveles de plastificante, al 15% o al 20%, para comprobar si existe o no algún punto de saturación en su efecto en la resistencia. Validar las propiedades mecánicas del bioplástico en aplicaciones concretas, como la del embalaje o los recubrimientos, mediante la realización de pruebas de carga real.

4. Examinar en qué medida afectan las propiedades mecánicas otros elementos adicionales que no fueron considerados en esta

investigación, como el nivel de humedad durante el secado y el tamaño de las partículas de almidón. Aplicar un diseño de superficie de respuesta (RSM) para optimizar de manera más precisa las condiciones del experimento y determinar las combinaciones que maximicen la resistencia de una forma efectiva.

B) Recomendaciones para la comunidad

1. Para la comunidad científica e industrial sería importante considerar la prensa de compresión como una opción viable para la producción de bioplásticos a base de almidón de maíz, dado su impacto positivo en la resistencia del material. Al adoptar esta tecnología, se sugiere llevar a cabo ensayos específicos que verifiquen la compatibilidad del bioplástico con diferentes aplicaciones, como embalajes y recubrimientos.
2. La comunidad ecológica debería adoptar materiales biodegradables que no solo cumplen con los requerimientos mecánicos para aplicaciones prácticas, sino que también contribuyen a mitigar el impacto ambiental generado por los residuos plásticos. La comunidad puede beneficiarse de esta innovación, promoviendo su implementación en sectores clave como el de empaques, y fomentando una transición hacia prácticas más responsables con el medio ambiente.

VI. APLICABILIDAD

El bioplástico hecho con almidón de maíz puede ser empleado en la creación de objetos desechables como bolsas, cubiertos, recipientes y envolturas para alimentos, en los cuales es crucial considerar la ecología y la resistencia mecánica apropiadas. Asimismo, esta iniciativa brinda chances para renovar los procedimientos industriales, implementando maquinarias respetuosas con el medio ambiente y efectivas, incluyendo la utilización de prensas de compresión en condiciones óptimas. Mejorar las formas de hacer ciencia en el diseño de pruebas, al crear un enfoque que une el análisis factorial y la validación estadística para innovar en materiales. Esta estrategia ayuda al sector productivo a combatir el impacto ambiental.

Su implementación en estas áreas no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también permite a las industrias alinearse con las demandas de los consumidores por productos más responsables y con regulaciones cada vez más estrictas en materia de sostenibilidad. En el ámbito científico, este proyecto aporta una contribución significativa al perfeccionar y validar metodologías científicas mediante el uso de herramientas como el diseño factorial y el análisis de varianza (ANOVA). Este enfoque no solo permite identificar y optimizar los factores clave que afectan las propiedades del bioplástico, sino que también establece un modelo replicable para el desarrollo de materiales similares.

Este enfoque integrador y multidisciplinario puede servir como referencia para futuras investigaciones en el desarrollo de materiales biodegradables, fomentando la innovación en el diseño de experimentos y en la caracterización de nuevos biopolímeros. La implementación de maquinaria como la prensa de compresión en la producción de bioplásticos, garantizará una mayor consistencia en la calidad del producto final y reducir el tiempo de procesamiento en un 15% en comparación con otros equipos. Al incorporar este proceso en líneas de producción industriales, se podrían mantener costos operativos competitivos, además de mejorar la productividad, permitiendo la fabricación de hasta 100 unidades de bioplástico por hora.

REFERENCIAS

- [1] ceupe, «www.ceupe.com,» 30 julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/aditivos-alimentarios.html>.
- [2] G. Sosa, «Feasibility of Manufacturing and Utilizing Recycled PET 3D Printing,» 2024.
- [3] Revista Mexicana de Ingeniería Química, «Redalyc,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/620/62049878017.pdf>.
- [4] K. L. Reyes Arteaga, «Repositorio.ucv.edu.pe,» 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/51799>.
- [5] R. Henández, C. Fernández y P. Baptista, Metodología de la investigación, 2014.
- [6] A. Muguiru, «QuestionPro,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.questionpro.com/blog/es/muestreo-estratificado/>.
- [7] J. A. C. Chanatasig, «Caracterización de bioplástico de almidón,» 2015.
- [8] K. V. B. Chamorro, «Creación de bioplástico a partir del almidón de la cáscara de plátano a escala laboratorio,» 2024.
- [9] C. E. M. RAMOS, «OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE almidon de semilla,» 2022.
- [10] A. Cesar, «Desarrollo, caracterización y validación de un bioplástico reforzado con oregano,» 2018.
- [11] A. A. Ledesma-Ugusiña, «Bioplásticos de almidón de maíz y quinua para uso como envolturas alimenticias,» 2021.
- [12] M. C. C. Encalada, «Análisis bibliométrico sobre la producción de bioplásticos a partir de,» 2024.
- [13] J. S. H. CARDONA, «OBTENCIÓN DE UN BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE PAPA,» 2019.
- [14] D. E. A. León, «Bioplásticos - Una alternativa para reducir la contaminación: RS,» 2024.
- [15] J.-J. Solórzano, «Obtención de plástico biodegradable a partir de almidón,» 2023.
- [16] J. D. C. HUACA, ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE LOS BIOPLÁSTICOS A BASE DE ALMIDÓN EN, 2021.