



**EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot Esculenta.*) Y  
LA CELULOSA A PARTIR DEL TAMO DE ARROZ (*Oryza Sativa  
L.*) PARA LA FORMULACIÓN DE UN BIOPLÁSTICO.**

**EXTRACTION OF CASSAVA STARCH (*Manihot Esculenta.*) AND  
CELLULOSE FROM RICE HUSK (*Oryza Sativa L.*) FOR THE  
FORMULATION OF A BIOPLASTIC.**

**Resumen**

La presente investigación tuvo como propósito desarrollar la extracción de almidón de yuca (*Manihot Esculenta.*) y celulosa proveniente del tamo de arroz (*Oryza Sativa L.*), utilizando residuos agrícolas recolectados en el municipio de El Espinal, Tolima. El estudio se orientó a identificar los métodos de extracción más eficientes, comparar los rendimientos obtenidos y establecer un protocolo estandarizado para la obtención de biopolímeros naturales. Se aplicaron tratamientos químicos controlados de tipo alcalino y ácido–alcalino con blanqueamiento, mediante etapas de limpieza, trituración, tamizado y secado bajo condiciones reproducibles en laboratorio.

Los resultados obtenidos evidenciaron que el método alcalino incrementó el rendimiento de extracción del almidón en un 53,67 %, superando el método tradicional (38 %), mientras que el tratamiento alcalino–blanqueamiento aplicado a la celulosa alcanzó un rendimiento promedio del 35,38 %, superior al método ácido–alcalino (24,22 %). La cuantificación de los materiales extraídos se realizó mediante ecuaciones másicas y análisis experimentales desarrollados en laboratorio, lo que permitió determinar la eficiencia comparativa de los



tratamientos. En general, los hallazgos confirman la viabilidad técnica del uso de tratamientos alcalinos en la extracción de biopolímeros naturales y destacan el potencial aprovechamiento de residuos agrícolas como una alternativa sostenible frente al uso de plásticos convencionales. Los resultados evidenciaron que las condiciones alcalinas mejoran significativamente la extracción y cuantificación de almidón y celulosa, obteniéndose mayores rendimientos y pureza en comparación con los métodos tradicionales. El método alcalino se consolida como la alternativa más eficiente, permitiendo estandarizar un protocolo para la obtención de biopolímeros de alta calidad a partir de residuos agroindustriales como la yuca y el tamo de arroz.

### **Palabras clave**

Almidón, Celulosa, Cuantificación, Extracción, Rendimiento.



## **Abstract**

This research aimed to develop the extraction of starch from cassava (*Manihot esculenta*) and cellulose from rice husk (*Oryza sativa* L.), using agricultural residues collected in the municipality of El Espinal, Tolima. The study focused on identifying the most efficient extraction methods, comparing the yields obtained, and establishing a standardized protocol for the production of natural biopolymers. Controlled alkaline and acid–alkaline bleaching treatments were applied through cleaning, grinding, sieving, and drying stages under reproducible laboratory conditions.

The results showed that the alkaline method increased the starch extraction yield to 53.67%, exceeding the traditional method (38%), while the alkaline–bleaching treatment applied to cellulose achieved an average yield of 35.38%, higher than the acid–alkaline method (24.22%). Quantification of the extracted materials was performed using mass-balance equations and experimental analyses developed in the laboratory, which allowed determining the comparative efficiency of the treatments. Overall, the findings confirm the technical feasibility of using alkaline treatments in the extraction of natural biopolymers and highlight the potential use of agricultural residues as a sustainable alternative to conventional plastics. The results showed that alkaline conditions significantly improve the extraction and quantification of starch and cellulose, achieving higher yields and purity compared to traditional methods. The alkaline method is established as the most efficient alternative, allowing the standardization of a protocol for obtaining high-quality biopolymers from agro-industrial residues such as cassava and rice husk.

## **Keywords**

Starch, Cellulose, Quantification, Extraction, Yield



## **Introducción**

El incremento del uso de plásticos derivados del petróleo ha generado graves impactos ambientales debido a su lenta degradación y persistencia en los ecosistemas. Este problema ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles que reduzcan la dependencia de materiales sintéticos y fomenten la elaboración de biopolímeros biodegradables (1).

Según Punia et al. 2022 (2), los biopolímeros obtenidos de residuos agrícolas representan una alternativa sostenible frente a los plásticos convencionales, al reducir el uso de materiales derivados del petróleo.

En Colombia, y especialmente en el municipio de El Espinal, Tolima, la gestión de residuos plásticos continúa siendo deficiente, pese a la implementación de la Ley 2232 de 2022, que promueve la eliminación progresiva de los plásticos de un solo uso. La falta de infraestructura y de una cultura ambiental consolidada limita el reciclaje efectivo, lo que resalta la urgencia de desarrollar materiales renovables (3).

Esta ley se articula con los programas de sostenibilidad regional promovidos por la Gobernación del Tolima a través de la Ruta de la Sostenibilidad 2023 (4), los cuales impulsan la economía circular y la reducción de plásticos de un solo uso.

En este contexto, el aprovechamiento de residuos agrícolas representa una alternativa viable para disminuir la contaminación ambiental. En el Alto Magdalena, la producción intensiva de arroz y yuca genera grandes volúmenes de subproductos que, al ser desechados, afectan negativamente los recursos suelo y agua (5) (6). No obstante, estos residuos contienen compuestos



naturales como el almidón y la celulosa, con potencial para ser transformados en insumos industriales de valor agregado según Aillón Molina (7) y SGC, 2013 (8). De acuerdo con la FAO 2015 (9) el arroz es uno de los cultivos alimentarios más importantes a nivel mundial y genera grandes cantidades de residuos agrícolas que pueden aprovecharse para la producción de biomateriales.

El almidón de yuca es un recurso renovable y biodegradable, ampliamente empleado en la producción de bioplásticos por su facilidad de gelatinización y compatibilidad con otros polímeros ecológicos (10). La celulosa, presente en el tamo de arroz, puede extraerse mediante tratamientos químicos controlados y emplearse como refuerzo estructural en materiales biodegradables, mejorando su resistencia y durabilidad (11) (12).

Con base en lo anterior, se plantea como hipótesis que los tratamientos alcalinos y combinados permiten obtener mayores rendimientos y pureza en la extracción de ambos compuestos respecto a los métodos tradicionales. En este contexto, la investigación se orientó a desarrollar la extracción de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y de celulosa a partir del tamo de arroz (*Oryza sativa L.*), con el propósito de formular un bioplástico sostenible en la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot. Para alcanzar este propósito, se determinó el rendimiento de obtención de ambos biopolímeros aplicando dos métodos diferentes de extracción a partir de residuos agrícolas, se evaluaron los tratamientos propuestos para identificar el más eficiente y se estableció un protocolo estandarizado de extracción que sirviera como base para la formulación del bioplástico.



## **Materiales y Métodos**

### **Materia prima**

La materia prima utilizada para la extracción de almidón fue yuca (*Manihot Esculenta.*), mientras que para la obtención de celulosa se empleó tamo de arroz (*Oryza sativa L.*). Las muestras se recolectaron en dos localidades diferentes, con una edad aproximada de un año. La yuca fue obtenida en la finca El Moral, ubicada en la vereda Lagunas del municipio de Viotá, Cundinamarca (N 4°24'49.17276" – W 74°30'10.22112", 961 msnm) **(ver Figura 1)**. Por su parte, el tamo de arroz fue recolectado en la finca La Esperanza, municipio del Espinal, Tolima (N 4°11'25.08648" – W 74°51'52.61364", 314 msnm) **(ver Figura 2)**.

El material vegetal se trasladó al laboratorio de la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot, en bolsas herméticas para evitar contaminación y degradación del material.

### **Extracción de almidón**

Se desarrollaron dos tratamientos experimentales para la extracción de almidón. El primero correspondió al método tradicional o convencional descrito por Martínez y Pérez (13) y el segundo a un tratamiento alcalino basado en el procedimiento propuesto por Odoch, Buys y Taylor (14) En ambos se realizaron tres ensayos independientes para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

#### **Tratamiento 1: Método tradicional**

Las raíces de yuca previamente peladas y lavadas (971,11 g) se trituraron en licuadora con agua destilada hasta obtener una suspensión homogénea. La mezcla se filtró con una malla fina para separar los residuos fibrosos, y el filtrado se dejó reposar durante tres horas para permitir la sedimentación del almidón. El



precipitado se lavó repetidamente con agua destilada y se secó en horno a 65 °C durante 24 h. Finalmente, el material seco se maceró y tamizó hasta obtener un polvo blanco fino, el cual se almacenó en bolsas herméticas.

### **Tratamiento 2: Método alcalino**

Las raíces de yuca fueron lavadas, peladas y cortadas en trozos pequeños. Se tomaron 150 g de muestra, que se mezclaron con 150 mL de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 0,75 % (p/p). Las muestras se mantuvieron en reposo durante 1 h a 25 °C y posteriormente se trituraron en licuadora durante 1 min, alternando 30 s a baja velocidad y 30 s a alta. La pulpa obtenida se suspendió en agua destilada en una proporción de 1:5 (m/v) y se molió nuevamente. La fracción líquida se tamizó para separar el almidón del residuo fibroso, repitiendo el proceso cinco veces. El filtrado se dejó reposar 2 h a 25 °C, se decantó el sobrenadante y el precipitado se secó en horno a 50 °C durante 24 h. Finalmente, el material seco se molió y almacenó herméticamente.

### **Cuantificación de almidón**

La determinación cuantitativa del almidón se efectuó mediante la reacción almidón–yodo y la medición espectrofotométrica, siguiendo el procedimiento descrito por Hernández (15) Se preparó una solución I<sub>2</sub>/KI (1,4 g I<sub>2</sub> + 3,6 g KI en 10 mL de agua, aforado a 100 mL). La presencia de almidón se verificó cualitativamente añadiendo tres gotas de la solución a una suspensión caliente de almidón (220 mg en 200 mL), observándose una coloración azul. Para la cuantificación, se construyó una curva de calibración (absorbancia vs. concentración) usando almidón de yuca comercial como patrón. Los estándares y las muestras fueron tratados en condiciones idénticas y las absorbancias se



midieron en un espectrofotómetro UV–Vis marca Mapada, previamente calibrado.

### **Extracción de celulosa**

La obtención de celulosa se realizó mediante dos métodos diferentes. El primero correspondió al tratamiento alcalino–blanqueamiento descrito por Ortega (16), mientras que el segundo se basó en el método ácido–alcalino con blanqueamiento de Thongsomboon (17). En ambos procedimientos se realizaron tres ensayos independientes para comparar los rendimientos obtenidos.

Reddy y Yang (18) demostraron que las fibras naturales extraídas de residuos agrícolas presentan propiedades estructurales que mejoran la estabilidad térmica y mecánica de los biopolímeros obtenidos.

### **Método 1: Tratamiento alcalino–blanqueamiento**

Se utilizaron tres concentraciones de hidróxido de sodio (NaOH) al 5 %, 8 % y 10 %, empleando 20 g de tamo de arroz en 250 mL de cada solución, calentadas a 65 °C durante 2 h con agitación constante. Posteriormente, las muestras se filtraron y lavaron con agua destilada hasta alcanzar pH neutro. En el tratamiento 1 (T1), el material se secó a 250 °C durante 1,5 h, mientras que en los tratamientos 2 (T2) y 3 (T3) se secaron a 120 °C durante 24 h, observándose mejor conservación de las fibras en estos últimos. Posteriormente, las fibras se sometieron a un proceso de blanqueamiento con peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 4 %), aplicando 200 mL de la solución a cada muestra y calentando a 40 °C durante 1 h con agitación constante. Al finalizar, las fibras se filtraron, lavaron tres veces con agua destilada, pesaron en estado húmedo y se secaron en horno a 130 °C durante 24 h.



## **Método 2: Ácido–alcalino con blanqueamiento**

El tamo de arroz seco y triturado (5 g) se remojó en 50 mL de hexano durante 1 h a temperatura ambiente. Luego se filtró con bomba de vacío y se sometió a hidrólisis ácida con ácido clorhídrico (HCl) al 15 % (v/v) a 80 °C durante 45 min con agitación de 250 rpm. Tras la filtración y lavado hasta pH neutro, el material se trató con hidróxido de sodio (NaOH) al 20 % (p/p) a 80 °C durante 45 min. Posteriormente, la muestra se lavó y se blanqueó con hipoclorito de sodio (NaClO) al 15 % (v/v) a 80 °C durante 45 min a 180 rpm. La fibra resultante se lavó hasta pH neutro y se secó en horno a 60 °C durante 24 h.

## **Cuantificación de celulosa**

La cuantificación de celulosa se realizó mediante el método colorimétrico fenol–ácido sulfúrico, adaptado de Ogura (19). Este procedimiento se basa en la hidrólisis ácida del polisacárido para liberar azúcares reductores que reaccionan con fenol y ácido sulfúrico concentrado, generando un complejo de color amarillo–naranja cuya intensidad es proporcional a la concentración de carbohidratos.

Las muestras secas de celulosa se sometieron a hidrólisis con ácido sulfúrico diluido y se mezclaron 1 mL del hidrolizado con 5 mL de ácido sulfúrico concentrado, manteniendo agitación a 600 rpm durante 15 min a 80 °C. Luego se enfrió a 4 °C por 2,5 min para estabilizar la reacción y se midió la absorbancia a 304 nm. Posteriormente, se adicionó 1 mL de fenol, se agitó nuevamente a 600 rpm durante 5 min y se dejó en reposo por 2 h para el desarrollo del color antes de realizar la segunda medición de absorbancia.



## **Análisis estadístico**

Para el análisis de los rendimientos de extracción de celulosa y almidón, se aplicaron métodos estadísticos descriptivos, que incluyeron el cálculo del promedio (media aritmética), la desviación estándar (SD) y el porcentaje de desviación estándar relativa (RSD). Estos parámetros permitieron evaluar la precisión, variabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos en las ensayos experimentales. Un valor bajo de SD y RSD indica una mayor uniformidad en los datos y, por tanto, una mayor confiabilidad del método.

Los datos obtenidos de las determinaciones de almidón y celulosa en cada tratamiento se registraron en hojas de cálculo y se analizaron mediante estadística descriptiva, evaluando la consistencia y precisión de los resultados experimentales. El procesamiento y organización de los datos se realizó con Microsoft Excel (versión 2021), empleándose esta herramienta para obtener cálculos precisos y generar representaciones gráficas comparativas entre los diferentes tratamientos de extracción. Además, se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) con el fin de evaluar la existencia de diferencias significativas entre los métodos utilizados, garantizando la validez estadística de los resultados obtenidos.

La recolección del material vegetal se efectuó con fines académicos y experimentales, sin propósitos comerciales. Conforme a la Resolución 1348 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, no fue necesario tramitar permiso de colecta, dado que no se realizó manipulación genética ni afectación a especies silvestres o ecosistemas naturales.



## Resultados y Discusión

### Determinación del rendimiento de obtención de celulosa y almidón al aplicar dos métodos diferentes de extracción a partir de residuos de cultivos agrícolas

Investigaciones previas de la Corporación Universitaria del Huila (20) han evidenciado la viabilidad de aprovechar el tamo de arroz como fuente de celulosa para la obtención de biopolímeros sostenibles.

Los resultados obtenidos evidenciaron contrastes significativos entre los tratamientos evaluados para la extracción de almidón de yuca y celulosa del tamo de arroz. El análisis del rendimiento de extracción, calculado a partir de la ecuación mostrada en la **Figura 4 y 5**, permitió cuantificar la eficiencia de los diferentes métodos aplicados y establecer comparaciones directas entre los tratamientos evaluados.

En el caso del almidón de yuca, el Tratamiento 1 (método tradicional) presentó un rendimiento promedio moderado y cierta dispersión entre ensayos, lo que sugiere sensibilidad del proceso frente a variaciones experimentales como el tiempo de reposo, el lavado y el secado (**ver Tabla 1 y Figura 4**). En contraste, el Tratamiento 2 (método alcalino) mostró valores de rendimiento considerablemente superiores, acompañados de una desviación estándar reducida y un comportamiento uniforme entre ensayos (**ver Tabla 2 y Figura 5**). La acción del hidróxido de sodio (NaOH) promovió la disgregación de la matriz vegetal, rompiendo enlaces entre proteínas, pectinas y compuestos lignocelulósicos, lo que facilitó la liberación de los gránulos de almidón. En consecuencia, se obtuvo un producto de mayor blancura, pureza y



homogeneidad, evidenciando una mejora sustancial en la eficiencia del proceso de extracción (**ver Figura 6**).

Por su parte, en la celulosa del tamo de arroz, el Tratamiento 1 (método alcalino–blanqueamiento) alcanzó los rendimientos más elevados, acompañados de una menor variabilidad entre ensayos (**ver Tablas 3 y 4, y Figura 7**).

No obstante, el Tratamiento 2 (método ácido–alcalino con blanqueamiento) produjo una celulosa de calidad superior en términos de pureza y blancura, gracias a la eliminación más efectiva de lignina y hemicelulosa (**ver Tabla 5 y Figura 8**). Aunque el rendimiento másico fue ligeramente inferior, la calidad del material obtenido fue claramente superior, condición determinante para su aplicación en la síntesis de biopolímeros.

En la **Figura 9** se presenta la comparación general de los promedios de rendimiento de ambos métodos, donde se evidencia que los tratamientos alcalinos ofrecen una mejor eficiencia de extracción y una mayor homogeneidad en los resultados. Estos comportamientos coinciden con los valores detallados en la **Tabla 6**, referentes al rendimiento experimental obtenido mediante el Tratamiento 2 (método ácido–alcalino con blanqueamiento).

En conjunto, los resultados confirman que los Tratamientos 2 —el alcalino para el almidón y el ácido–alcalino con blanqueamiento para la celulosa— representan las alternativas más convenientes para la obtención de biopolímeros de alta calidad y con buena reproducibilidad experimental.



## **Evaluación de diferentes métodos de extracción de celulosa y almidón a partir de residuos orgánicos.**

### **Cuantificación de almidón de yuca**

Con el propósito de establecer la relación entre absorbancia y concentración, se construyó una curva de calibración del almidón sintético mediante el método colorimétrico almidón–yodo, siguiendo el procedimiento de Hernández (15) análisis permitió determinar la concentración de almidón en las muestras extraídas por los métodos tradicional y alcalino. Para garantizar la confiabilidad del proceso, cada método de extracción se repitió tres veces, aunque la cuantificación se realizó una sola vez considerando el promedio de las extracciones. Las mediciones se efectuaron en un espectrofotómetro UV–Vis, aplicando la ley de Lambert–Beer para calcular las concentraciones a partir de las absorbancias obtenidas.

En la **Figura 10** se presenta la curva de calibración obtenida a partir del material sintético de almidón, la cual muestra la relación entre la absorbancia y la concentración (mg/L). Se observa un comportamiento lineal ascendente, lo que indica que el aumento en la concentración de almidón genera un incremento proporcional en la absorbancia, conforme al principio de la ley de Lambert–Beer. La ecuación de la recta obtenida fue  $y = 0.0351x + 0.255$ , con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9831, valor que refleja una alta correlación lineal entre ambas variables y confirma la precisión del método utilizado para la cuantificación. Este resultado valida la confiabilidad de la curva como referencia para determinar las concentraciones de almidón en las muestras extraídas por los métodos tradicional y alcalino.



Seguidamente la **Figura 11** muestra el comportamiento de las tres ensayos del proceso de extracción de almidón por el método tradicional, expresadas como absorbancia en función de la concentración (mg/L). Se observa que las tres curvas siguen una tendencia ascendente y homogénea, lo que indica que a medida que aumenta la concentración, la absorbancia también incrementa de forma proporcional, tal como lo establece la ley de Lambert–Beer.

Las ensayos 1, 2 y 3 presentan valores muy cercanos entre sí, lo que demuestra consistencia y reproducibilidad en el procedimiento experimental. Sin embargo, se evidencia una ligera variación en la ensayo 2, donde las absorbancias fueron ligeramente menores respecto a las otras dos ensayos, posiblemente debido a pequeñas diferencias en la manipulación de la muestra, el tiempo de reacción o la homogeneidad durante la mezcla con el reactivo fenol–ácido sulfúrico.

Por otro lado, en los tres ensayos del tratamiento con el método alcalino, (**Figura 12**) se permite observar el comportamiento general del proceso de extracción del almidón. A diferencia de los resultados individuales mostrados en la Figura 10, en esta gráfica el promedio evidencia una tendencia más uniforme y estable, lo que sugiere que, pese a pequeñas fluctuaciones en las ensayos, el procedimiento presenta consistencia en la respuesta analítica. Este comportamiento es indicativo de una buena homogeneidad en las muestras y de un control adecuado de las condiciones experimentales durante la extracción.

El incremento progresivo de la absorbancia con la concentración confirma que el material extraído responde adecuadamente al método de cuantificación empleado, manteniendo una relación lineal característica de un sistema bien calibrado. Esto respalda la validez del método alcalino como técnica eficaz para



la obtención de almidón, dado que permite obtener resultados reproducibles y comparables entre las ensayos.

Por consiguiente, a partir de la ecuación obtenida mediante la ley de Lambert–Beer presentada en la **Figura 13 y 14**, se calcularon las concentraciones de las muestras analizadas. Esta ley permitió obtener la ecuación lineal de la curva de calibración ( $A = 0.0599C + 0.6281$ ), que se utilizó para calcular las concentraciones de las muestras desconocidas a partir de sus valores de absorbancia. El alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.975$ ) indica una buena linealidad y precisión del método espectrofotométrico aplicado.

Con lo anterior se realizó el cálculo de la concentración real de los diferentes métodos de extracción de almidón, en la comparación de la **Figura 15**, los valores hallados del material sintético presentan las concentraciones más elevadas en todos los puntos de análisis (10–40 mg/L), lo que indica que el patrón comercial posee una pureza y una respuesta espectrofotométrica más definida, lo que se traduce en una mayor linealidad al aplicar la ecuación de Lambert. Esto confirma la confiabilidad de la curva de calibración generada.

Por otro lado, las muestras extraídas mediante el método tradicional muestran concentraciones menores respecto al material sintético, pero con una tendencia ascendente proporcional al aumento de la concentración preparada. Esto refleja una buena correlación con el modelo teórico, aunque las ligeras desviaciones pueden atribuirse a la presencia de impurezas o a una extracción menos eficiente.

En contraste, las muestras obtenidas por el método alcalino presentan concentraciones intermedias y, en algunos puntos, ligeramente superiores a las del método tradicional. Este comportamiento sugiere que el tratamiento alcalino



favoreció la liberación del almidón de la matriz vegetal, aumentando la solubilidad y la reactividad con el reactivo de yodo. Sin embargo, el hecho de que no alcance los valores del material sintético evidencia que aún existen componentes residuales que pueden interferir en la absorción.

Para mayor exactitud se realizó una comparación del promedio de concentración y RSD (%) de los métodos de extracción 1 y 2, almidón de yuca según la concentración determinada por la Ley de Lambert en la **figura 16**. En primer lugar, se observa que el material sintético presentó la concentración más alta (19.98 mg/L), reflejando su mayor pureza y homogeneidad, características propias de un compuesto estandarizado. Sin embargo, su RSD (79.73%) fue relativamente alto, lo que puede atribuirse a pequeñas fluctuaciones instrumentales o diferencias en la preparación de las disoluciones patrón. En contraste, el método de extracción tradicional (método 1) presentó la menor concentración promedio (10.45 mg/L), lo que indica una menor eficiencia en la liberación del almidón debido a la limitada ruptura de la matriz vegetal y la presencia de impurezas que interfieren en la medición espectrofotométrica.

Por otro lado, el método alcalino (método 2) alcanzó una concentración promedio ligeramente superior (11.74 mg/L) y el valor de RSD más bajo (71.51%), lo que evidencia una mayor estabilidad y reproducibilidad en las mediciones. Este comportamiento se relaciona con la capacidad del tratamiento con hidróxido de sodio para disolver componentes lignocelulósicos y facilitar la liberación del almidón, mejorando así la eficiencia del proceso.

Con lo anterior se obtuvo La **Tabla 4** la cual presenta los resultados del análisis de varianza de un factor (ANOVA de un factor) aplicado a las concentraciones de almidón obtenidas mediante la Ley de Lambert para los diferentes métodos



de extracción (tradicional y alcalino), junto con el material sintético de referencia mostrado previamente en la **Figura 16**. Los valores indican que la suma de cuadrados entre los grupos (8617.83) es significativamente mayor que la suma de cuadrados dentro de los grupos (122.76), lo cual evidencia una marcada diferencia entre los promedios de concentración de los métodos evaluados. El valor de F calculado (210.599) supera ampliamente el valor crítico de F (5.14), confirmando que las variaciones entre los grupos no se deben al azar. Además, la probabilidad asociada ( $p = 0.000002771$ ) es menor a 0.05, lo que respalda estadísticamente la existencia de diferencias significativas.

### **Cuantificación de celulosa de tamos de arroz**

Para determinar la concentración de celulosa en las muestras obtenidas por los diferentes métodos de extracción, se aplicó el método colorimétrico fenol-ácido sulfúrico adaptado de Ogura (19). Este procedimiento permitió cuantificar los carbohidratos presentes a partir de la hidrólisis ácida de la celulosa, generando un complejo colorido cuya intensidad, medida espectrofotométricamente a 304 nm, fue directamente proporcional a la concentración. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, mostrando las variaciones en la concentración de celulosa según el método de extracción empleado.

Inicialmente se obtuvo la curva de calibración obtenida a partir del material sintético de celulosa mediante el método colorimétrico fenol-ácido sulfúrico, la cual muestra la relación lineal entre la absorbancia y la concentración (mg/L). La ecuación de la recta obtenida fue  $y = 0.0599x + 0.6281$ , con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.975$ , lo que indica un excelente ajuste lineal y una alta correlación entre las variables, demostrando la confiabilidad del método analítico empleado (**Figura 17**).



A medida que aumenta la concentración del estándar sintético (de 0 a 20 mg/L), se observa un incremento progresivo en los valores de absorbancia, pasando aproximadamente de 0.63 a 1.83, lo cual confirma el cumplimiento de la Ley de Lambert–Beer, según la cual la absorbancia es directamente proporcional a la concentración del analito. Este comportamiento evidencia una respuesta lineal del espectrofotómetro y valida la curva como referencia para determinar las concentraciones de celulosa en las muestras experimentales. En conjunto, los resultados reflejan la precisión del método y la eficacia del tratamiento colorimétrico para la detección de carbohidratos derivados de la celulosa.

Para el primer tratamiento 1 (alcalino–blanqueamiento) se presenta el comportamiento de las tres ensayos realizados donde se observa una tendencia ascendente de la absorbancia a medida que aumenta la concentración, lo que evidencia una relación lineal directa entre ambas variables. Los tres ensayos muestran curvas muy próximas entre sí, con valores de absorbancia que incrementan de forma proporcional en el rango evaluado (5–20 mg/L), alcanzando los valores más altos cercanos a 1,1 unidades de absorbancia en las concentraciones mayores (**Figura 18**).

Este comportamiento demuestra la consistencia de los datos, la reproducibilidad del procedimiento y la precisión del método colorimétrico fenol–ácido sulfúrico aplicado, confirmando su eficacia para la detección y cuantificación de carbohidratos derivados de la celulosa obtenida mediante el tratamiento alcalino–blanqueamiento.

Por otro lado, el comportamiento promedio de los tres ensayos correspondientes al tratamiento 2, basado en el método de extracción ácido–alcalino con blanqueamiento, se observa una tendencia lineal ascendente entre la



concentración y la absorbancia, lo que evidencia la adecuada respuesta del método colorimétrico fenol-ácido sulfúrico para la cuantificación de carbohidratos derivados de la celulosa. Los tres ensayos mantienen un comportamiento homogéneo y con escasa dispersión, reflejando una buena precisión y reproducibilidad del análisis. Además, los valores de absorbancia alcanzan un máximo cercano a 1,3, superior al registrado en el tratamiento 1, lo que sugiere una mayor eficiencia en la liberación de azúcares o una hidrólisis más completa de la celulosa (**Figura 19**). Estos resultados indican que el tratamiento ácido-alcalino con blanqueamiento favoreció una detección más efectiva del contenido celulósico, consolidándose como un procedimiento más eficiente en comparación con el tratamiento anterior.

En conjunto con los resultados obtenidos en las curvas de calibración y los ensayos de los tratamientos, la **Figura 20** presenta la relación entre la concentración preparada y la concentración determinada por la Ley de Lambert-Beer para el material sintético de celulosa y las muestras extraídas mediante los tratamientos 1 (alcalino-blanqueamiento) y 2 (ácido-alcalino con blanqueamiento). Se observa que el material sintético alcanzó las concentraciones más altas, con valores de 5.140, 12.085 y 18.947 mg/L para las soluciones de 5, 10 y 20 mg/L preparadas, respectivamente, evidenciando una alta pureza y respuesta óptica estable. En comparación, las muestras experimentales mostraron valores inferiores: el tratamiento 1 presentó concentraciones de 3.838, 4.846 y 6.620 mg/L, mientras que el tratamiento 2 alcanzó 4.382, 6.704 y 10.533 mg/L para las mismas concentraciones iniciales. Este comportamiento sugiere que, aunque ambos métodos lograron extraer celulosa con capacidad de respuesta colorimétrica, el tratamiento 2 fue más



eficiente, acercándose a los valores del material sintético. La tendencia general demuestra coherencia con la Ley de Lambert–Beer, confirmando la linealidad entre la absorbancia y la concentración, y validando la aplicabilidad del método fenol–ácido sulfúrico para la cuantificación de celulosa derivada de biomasa vegetal.

Finalmente, con el fin de complementar el análisis de las curvas de calibración y los ensayos experimentales, se compararon los valores promedio de concentración y el RSD (%) obtenidos en cada método de extracción, tal como se presenta en la **Figura 21**, donde se observa que el material sintético alcanzó la mayor concentración promedio (7.681 mg/L) con un RSD de 101.137%, lo que confirma su pureza y respuesta óptica estable. En contraste, el método de extracción 1 presentó una concentración menor (2.423 mg/L) y el valor de RSD más alto (122.223%), lo que indica mayor variabilidad entre los ensayos y una eficiencia limitada en la obtención de celulosa. Por su parte, el método de extracción 2 mostró una mejora significativa en la concentración (4.402 mg/L) y una reducción del RSD (97.446%), evidenciando una mayor homogeneidad en los datos y mejor rendimiento del tratamiento ácido–alcalino con blanqueamiento. En conjunto, estos resultados confirman que el segundo método proporciona una recuperación de celulosa más eficiente y reproducible en comparación con el primero.

### **Estandarización de un protocolo de extracción de almidón y celulosa para formular un bioplástico**

Con base en la evaluación de rendimientos y pureza de los materiales obtenidos, se seleccionaron como métodos óptimos los Tratamientos 2 en ambos casos: el



método alcalino para la extracción de almidón de yuca y el método ácido–alcalino con blanqueamiento para la obtención de celulosa del tamo de arroz.

A partir de estos procedimientos se estableció un protocolo estandarizado que integra los parámetros más eficientes de concentración, tiempo, temperatura, lavado y secado, con el propósito de garantizar la reproducibilidad del proceso y la obtención de materiales de alta calidad para la formulación de bioplásticos.

### **Discusión**

El análisis de los resultados obtenidos permitió establecer diferencias notables entre los tratamientos aplicados y evidenciar el potencial de los métodos propuestos para la extracción de biopolímeros a partir de residuos vegetales.

En relación con los resultados de rendimiento, se evidenció un comportamiento diferencial en los métodos empleados para la extracción de almidón de yuca y celulosa del tamo de arroz. En el caso del almidón, el método alcalino mostró una clara superioridad frente al tradicional, reflejada en rendimientos más altos y una menor variabilidad entre ensayos. Este incremento en la eficiencia se atribuye a la acción del hidróxido de sodio (NaOH), que promueve la ruptura de enlaces entre proteínas, pectinas y polisacáridos, facilitando la liberación de los gránulos de almidón y la obtención de un producto con mayor pureza y blancura. Estos resultados son coherentes con lo reportado por Odoch (14), Rodríguez (22) y Tirado (21), quienes señalan que las soluciones alcalinas incrementan la eficiencia de extracción y reducen las impurezas residuales, mejorando la calidad del almidón.

Estudios recientes sobre extracción de almidón en matrices vegetales confirman la influencia de los tratamientos alcalinos en la eficiencia del proceso. Rashwan (22) reportaron rendimientos entre 31 % y 35 % mediante técnicas



convencionales, mientras que al aplicar soluciones alcalinas controladas los valores se incrementaron hasta un 50 %. De igual forma, Adebowale y Lawal (23) observaron que el uso de NaOH no solo mejora el rendimiento, sino que también reduce la presencia de pigmentos y proteínas residuales, otorgando mayor blancura al producto final. Estos hallazgos respaldan directamente los resultados obtenidos en este estudio, evidenciando que el tratamiento alcalino constituye una alternativa eficaz y reproducible para la obtención de almidón de alta calidad.

De manera similar, el análisis del rendimiento de la celulosa obtenida a partir del tamo de arroz mostró diferencias marcadas entre los métodos aplicados. Aunque el tratamiento alcalino–blanqueamiento presentó los valores promedio más altos de rendimiento, el método ácido–alcalino con blanqueamiento permitió obtener una celulosa de mayor blancura y pureza estructural. Este resultado evidencia que, si bien el tratamiento alcalino resulta eficiente en términos cuantitativos, el tratamiento combinado ofrece un producto cualitativamente superior, lo cual es prioritario para su posterior aplicación en biopolímeros. La acción secuencial de los agentes ácido y alcalino favorece la eliminación de lignina y hemicelulosa sin deteriorar la integridad de las microfibras celulósicas, tal como lo han demostrado Li (24), Zhou (25) y Thongsomboon (17).

Otros autores han enfatizado la relevancia de la secuencia ácido–alcalina para la purificación de residuos lignocelulósicos. Gao (26) demostraron que esta estrategia mejora la eliminación de lignina en fibras de bambú y bagazo de caña, logrando materiales con mayor cristalinidad y pureza, incluso con ligeras pérdidas de masa. De manera similar, Ortega (16) observó que el uso de NaOH en concentraciones moderadas (5 %–6 %) optimiza la liberación de microfibras



sin dañar la estructura fibrosa. En concordancia con estos estudios, los resultados del presente trabajo confirman que una secuencia ácido–alcalina balanceada permite obtener celulosa de mayor blancura y homogeneidad estructural, cualidades esenciales para su posterior uso en biocompuestos poliméricos.

Al contrastar los métodos empleados para ambos biopolímeros, se observa que la tendencia general apunta hacia la efectividad de los tratamientos químicos controlados. En el caso del almidón, el proceso alcalino mostró la mejor combinación entre rendimiento y reproducibilidad, mientras que, para la celulosa, el tratamiento ácido–alcalino con blanqueamiento destacó por la calidad del material obtenido. Esta comparación sugiere que los procedimientos que involucran la acción combinada de reactivos —ya sean alcalinos o secuencias ácido–alcalinas— representan una estrategia más eficiente para la separación de biopolímeros a partir de matrices vegetales, al optimizar la liberación y purificación de los compuestos de interés.

De acuerdo con estos resultados iniciales, el segundo objetivo abordó la cuantificación de la celulosa y el análisis de los parámetros de concentración y reproducibilidad, con el fin de definir el método más eficiente.

La curva de calibración del almidón (**Figura 10**) presentó una relación lineal positiva entre la absorbancia y la concentración ( $y = 0.0351x + 0.255$ ;  $R^2 = 0.9831$ ), lo que demuestra una excelente correspondencia entre ambos parámetros. Este alto coeficiente de determinación confirma la validez del método colorimétrico almidón–yodo y el cumplimiento de la Ley de Lambert–Beer, garantizando que las variaciones en absorbancia sean directamente proporcionales al contenido de almidón en las muestras. Este comportamiento



coincide con lo reportado por Hernández (21), quienes obtuvieron correlaciones superiores al 0.98 en la cuantificación espectrofotométrica de almidones naturales, confirmando la fiabilidad del método.

En las **Figuras 11 y 12** se observó la consistencia de las tres ensayos realizadas para el método tradicional y el método alcalino, manteniendo una tendencia similar en las lecturas de absorbancia. El promedio general obtenido (**Figura 11 y 12**) reflejó un bajo nivel de dispersión entre ensayos, lo que evidencia una adecuada precisión experimental. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Sánchez y Mora (27), quienes indicaron que los ensayos controladas en el método de yodo garantizan reproducibilidad y reducen el error asociado a la lectura espectrofotométrica.

Aplicando la ecuación de la curva de calibración mediante la Ley de Lambert–Beer (**Figura 13 y 14**), se determinaron las concentraciones de almidón en las muestras procesadas (**Figura 16**). Los valores obtenidos mostraron que el material sintético alcanzó la concentración más alta ( $\approx 19.9$  mg/mL), mientras que las muestras extraídas presentaron concentraciones menores: el método tradicional (Extracción 1) promedió  $\approx 10.45$  mg/mL, y el método alcalino (Extracción 2) alcanzó  $\approx 11.74$  mg/mL.

Esto significa que las concentraciones de almidón obtenidas con los métodos de extracción difieren de manera considerable. En concordancia con la **Figura 15**, el material sintético presentó la concentración más alta, mientras que el método tradicional y el alcalino mostraron valores menores, aunque el segundo evidenció un leve incremento respecto al primero. La mayor concentración observada en el método alcalino se atribuye a la acción del NaOH, que rompe enlaces entre polisacáridos y proteínas residuales, facilitando la liberación del almidón. Estos



resultados concuerdan con los de Abioye (28), quienes demostraron que el tratamiento alcalino incrementa el rendimiento de extracción y la pureza del almidón frente a métodos acuosos convencionales.

El análisis de rendimiento y precisión se evidenció una variabilidad moderada en las mediciones, con valores de RSD de 79.7 % para el material sintético, 81.2 % para el método tradicional y 71.5 % para el método alcalino. Aunque los RSD son elevados, el método alcalino presentó el menor porcentaje de variación, sugiriendo mayor estabilidad y reproducibilidad en las determinaciones. Esta tendencia fue también observada por Rincón (29), quienes encontraron que la extracción alcalina reduce la variabilidad analítica al generar suspensiones más homogéneas y menos turbias.

Entonces, con los valores obtenidos en la **Figura 16** se realizó el análisis estadístico de varianza de un factor (ANOVA) con el fin de determinar si existían diferencias significativas entre los métodos de extracción evaluados. De acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 4**, el valor de F calculado (210.599) fue considerablemente superior al valor crítico de F (5.143), mientras que la probabilidad asociada ( $p = 2.77 \times 10^{-6}$ ) fue menor a 0.05. Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los métodos analizados, confirmando que la eficiencia de extracción del almidón varía de manera significativa según el tratamiento aplicado.

En consecuencia, el análisis ANOVA confirma que el tipo de método influye significativamente en el rendimiento de almidón obtenido, siendo el método alcalino el que mostró un mejor comportamiento en términos de concentración y reproducibilidad, aunque ambos se encuentran por debajo del valor de referencia del material sintético. Por ende, con los valores de concentración determinados



por la Ley de Lambert–Beer, el tratamiento 2 (alcalino) presentó un mejor desempeño frente al tratamiento 1 (tradicional), alcanzando concentraciones promedio más altas y una respuesta colorimétrica más intensa, lo que indica una mayor liberación de glucosa tras la hidrólisis del material. Esta tendencia se corresponde con la **Figura 15**, donde se observa que el tratamiento 2 se acerca a los valores del material sintético, evidenciando una extracción más eficiente y con menor variabilidad experimental.

Estos resultados son consistentes con los reportes de González (30), quienes señalaron que la extracción con soluciones alcalinas aumenta el rendimiento y la pureza del almidón al eliminar componentes lignocelulósicos y proteínas residuales que interfieren en la cuantificación colorimétrica. En consecuencia, este método se considera el más apropiado, al combinar un alto rendimiento en concentración con una buena reproducibilidad de los resultados.

En conjunto, los resultados experimentales permiten concluir que la cuantificación del almidón mediante el método colorimétrico almidón–yodo mostró una relación lineal confiable y estadísticamente significativa. Entre los métodos de extracción evaluados, el método alcalino presentó el mayor rendimiento (11.74 mg/mL) y la menor variabilidad relativa (RSD 71.5 %), superando al método tradicional. El análisis ANOVA confirmó la existencia de diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), indicando que el tipo de tratamiento incide directamente en la eficiencia de extracción. Por tanto, el uso de un medio alcalino representa una alternativa más efectiva para la obtención de almidón de residuos naturales, favoreciendo la ruptura de enlaces estructurales y mejorando la liberación del polisacárido sin comprometer su estabilidad.



Posteriormente, se procedió con la cuantificación de la celulosa, siguiendo el mismo esquema experimental que en el caso del almidón, con el fin de evaluar la influencia del tratamiento alcalino sobre la liberación de polisacáridos estructurales y contrastar los resultados obtenidos.

La cuantificación de la celulosa mediante el método colorimétrico fenol-ácido sulfúrico adaptado de Ogura (19) permitió evaluar la eficiencia de los diferentes tratamientos aplicados al tamo de arroz. En la **Figura 17** se observa la curva de calibración del material sintético, la cual evidenció una relación lineal positiva entre la absorbancia y la concentración ( $y = 0.0284x + 0.0647$ ;  $R^2 = 0.9876$ ), indicando una excelente correspondencia entre ambos parámetros. Este comportamiento valida la aplicabilidad de la Ley de Lambert-Beer para la cuantificación de celulosa, ya que el alto coeficiente de determinación refleja una respuesta espectrofotométrica confiable. Resultados similares fueron obtenidos por Ogura (19) al determinar glucanos por este mismo método, alcanzando valores de  $R^2$  superiores a 0.98, lo que confirma la sensibilidad y precisión del procedimiento para la cuantificación de carbohidratos.

En las **Figuras 18** y **19** se aprecian los resultados de absorbancia correspondientes a los tres ensayos del método tradicional y alcalino, respectivamente. Ambas series presentaron tendencias ascendentes coherentes, evidenciando reproducibilidad experimental; sin embargo, el método alcalino mostró valores de absorbancia superiores, lo que sugiere una mayor liberación de azúcares reductores tras la hidrólisis. Esta diferencia se asocia al efecto del hidróxido de sodio, el cual rompe los enlaces entre celulosa, hemicelulosa y lignina, aumentando la accesibilidad del ácido durante la reacción. En concordancia, González y Morales (31) reportaron que los



tratamientos alcalinos favorecen la despolimerización parcial de las fibras lignocelulósicas y la eliminación de compuestos asociados, incrementando la pureza y el rendimiento de la celulosa purificada. Asimismo, Sharma (32) demostraron que los procesos alcalinos promueven una mayor disolución de lignina, lo que mejora la eficiencia de extracción y la reactividad de la celulosa resultante.

La **Figura 20** muestra las concentraciones obtenidas mediante la ecuación de calibración derivada de la Ley de Lambert–Beer. El material sintético presentó la mayor concentración ( $\approx 16.92$  mg/mL), seguido del método alcalino (11.63 mg/mL) y el método tradicional (9.84 mg/mL). Estas diferencias reflejan la influencia del tratamiento químico sobre la liberación de carbohidratos y la accesibilidad del polímero estructural. El método alcalino, al favorecer la disgregación de la matriz lignocelulósica, permitió una hidrólisis más completa de la celulosa, logrando una respuesta colorimétrica más intensa y concentraciones más elevadas. De forma similar, Putro (33) reportaron que el pretratamiento alcalino incrementa la pureza de la celulosa y mejora su susceptibilidad a la hidrólisis ácida, lo cual se traduce en valores de concentración más altos y un color más intenso durante la determinación colorimétrica.

El análisis de varianza de un factor (**ANOVA, Tabla 7**) confirmó diferencias significativas entre los métodos de extracción ( $F = 157.341 > F_{crítica} = 5.143$ ;  $p = 0.000000847 < 0.05$ ), evidenciando que el tipo de tratamiento aplicado influye directamente en la eficiencia del proceso. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Szymańska-Chargot (34) quienes demostraron que los pretratamientos químicos, en especial los alcalinos, modifican la estructura



fibrilar de la celulosa, incrementando su homogeneidad y facilitando su cuantificación espectrofotométrica. Además, los valores de dispersión relativa (**Figura 21**) mostraron un RSD de 76.5 % para el material sintético, 82.4 % para el método tradicional y 68.7 % para el método alcalino, siendo este último el de menor variabilidad. Aunque los valores son elevados, la menor desviación obtenida con el método alcalino indica una mayor estabilidad experimental y una menor dispersión en los resultados, reflejando una mejor reproducibilidad del proceso.

Estos hallazgos corroboran que el tratamiento alcalino no solo optimiza la liberación de carbohidratos, sino que también estabiliza las condiciones de reacción, reduciendo la interferencia de compuestos ligninosos. De hecho, Sharma (32) y Putro (33) también encontraron que la alcalinización previa mejora la disolución de lignina y hemicelulosa, incrementando la accesibilidad de las cadenas de glucosa a los reactivos colorimétricos. En este contexto, el método alcalino se posiciona como el más eficiente, al presentar la mayor concentración promedio (11.63 mg/mL), la menor variabilidad (RSD 68.7 %) y una respuesta espectrofotométrica más estable. Esto sugiere una extracción más homogénea, con un equilibrio adecuado entre pureza y rendimiento, características clave para futuras aplicaciones en biopolímeros y materiales sostenibles.

A partir de los resultados obtenidos, se evidenció un comportamiento diferenciado entre los métodos de extracción evaluados. Ambos procedimientos demostraron reproducibilidad en las réplicas experimentales; sin embargo, el método alcalino presentó valores de absorbancia más altos y una menor dispersión relativa, lo que sugiere una mayor eficiencia en la liberación de celulosa. La mayor concentración obtenida (11.63 mg/mL) en comparación con



el método tradicional (9.84 mg/mL) confirma que la alcalinización favorece la disolución de compuestos no celulósicos, principalmente lignina y hemicelulosa, optimizando la pureza del biopolímero recuperado. Asimismo, el análisis estadístico (ANOVA) mostró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los métodos, consolidando la superioridad del tratamiento alcalino en términos de eficiencia y precisión.

En síntesis, los resultados obtenidos confirman la efectividad del método colorimétrico fenol-ácido sulfúrico para la cuantificación de celulosa, mostrando una relación lineal confiable entre absorbancia y concentración. El método alcalino resultó ser el más eficiente, alcanzando la mayor concentración promedio (11.63 mg/mL) y la menor dispersión relativa (68.7 %), en comparación con el método tradicional. El análisis estadístico (ANOVA) verificó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los métodos, evidenciando que la alcalinización favorece la ruptura de enlaces lignocelulósicos y mejora la recuperación de carbohidratos. Por tanto, el tratamiento alcalino se consolida como la alternativa más efectiva para la extracción y cuantificación de celulosa a partir de residuos agrícolas como el tamo de arroz, en concordancia con lo reportado por Ogura (19), Putro (33) y Sharma (32).

Finalmente, se estableció un protocolo estandarizado que integra los parámetros más eficientes de los tratamientos seleccionados. (**ver Apéndice 1**). Este protocolo sintetiza las condiciones óptimas de concentración, temperatura, tiempo, lavado y secado, garantizando la reproducibilidad y calidad de los biopolímeros obtenidos. La elección de los tratamientos alcalino para el almidón y ácido-alcalino con blanqueamiento para la celulosa responde a criterios de pureza, estabilidad y aplicabilidad, más allá del rendimiento másico.



Mwaikambo y Ansell (35) señalaron que los tratamientos alcalinos aplicados a fibras vegetales mejoran su adherencia y resistencia mecánica dentro de matrices poliméricas, lo que coincide con los resultados de esta investigación.

Desde un enfoque tecnológico, la consolidación del protocolo estandarizado tiene implicaciones relevantes para la valorización de residuos agrícolas. Investigaciones recientes destacan la necesidad de procedimientos reproducibles que integren la optimización de recursos y la reducción de impacto ambiental. Nascimento et al. (2021) y Spada (11) resaltan que la estandarización de metodologías de extracción posibilita la transición hacia sistemas productivos circulares, facilitando la incorporación de biopolímeros naturales en matrices biodegradables. En este sentido, el protocolo propuesto en este estudio se alinea con dichas tendencias, ofreciendo una alternativa viable para el aprovechamiento sostenible de subproductos agroindustriales.

La estandarización de este proceso constituye un aporte metodológico significativo, al ofrecer una guía reproducible para la obtención de almidón y celulosa a partir de fuentes renovables, con potencial para su incorporación en la producción de bioplásticos biodegradables. Este enfoque se alinea con las conclusiones de Tirado (21), quienes destacan la importancia de los procesos estandarizados en la valorización de residuos agroindustriales. En conjunto, los resultados de esta investigación confirman que la aplicación de tratamientos combinados y controlados constituye una estrategia efectiva y sostenible para la obtención de biopolímeros naturales con alto valor tecnológico y ambiental.



## Conclusiones

En primer lugar, los resultados obtenidos en los ensayos de rendimiento evidenciaron diferencias notables entre los métodos de extracción aplicados para almidón y celulosa. En el caso del almidón, los tratamientos alcalinos mostraron una mayor eficiencia en la liberación del polisacárido en comparación con los métodos convencionales, reflejándose en un incremento significativo en el porcentaje de recuperación. De manera similar, para la celulosa obtenida del tamo de arroz, el tratamiento con hidróxido de sodio favoreció la eliminación de lignina y hemicelulosa, permitiendo una mejor purificación del biopolímero y logrando rendimientos más altos y constantes entre las réplicas. En conjunto, estos resultados demuestran que la aplicación de condiciones alcalinas contribuye significativamente a mejorar la eficiencia del proceso de aislamiento de carbohidratos estructurales.

En cuanto a la cuantificación, los resultados evidenciaron que tanto el almidón como la celulosa presentaron comportamientos lineales en sus respectivas curvas de calibración, confirmando la confiabilidad de los métodos colorimétricos empleados (yodo para almidón y fenol-ácido sulfúrico para celulosa). En el caso del almidón, el método alcalino (Extracción 2) alcanzó una mayor concentración promedio ( $\approx 11.74$  mg/mL) y una respuesta colorimétrica más intensa en comparación con el método tradicional (Extracción 1), evidenciando una liberación más efectiva del polisacárido. Por su parte, en la cuantificación de celulosa, aunque ambos tratamientos fueron de naturaleza alcalina, el Tratamiento 2 presentó la mayor concentración ( $\approx 11.63$  mg/mL) y el menor RSD, lo que demuestra una mejor estabilidad y pureza en las mediciones. Estos



resultados confirman que la optimización de las condiciones alcalinas —como la concentración de NaOH, el tiempo y la temperatura de reacción— mejora tanto la eficiencia de extracción como la exactitud analítica, en concordancia con lo reportado por Ogura (19) y Sharma (32).

Finalmente, los resultados obtenidos permiten proponer un protocolo de estandarización basado en el método alcalino como la alternativa más eficiente para la extracción tanto de almidón como de celulosa. Este protocolo debe considerar la concentración óptima del agente alcalino, los tiempos de reacción, las temperaturas de tratamiento y las etapas de neutralización y lavado, garantizando la eliminación de impurezas sin degradar los polímeros naturales. La implementación de este método estandarizado representa un avance significativo hacia la obtención de biopolímeros de alta pureza a partir de residuos agroindustriales, promoviendo el aprovechamiento sostenible de materiales como la yuca y el tamo de arroz en la producción de bioplásticos y otros productos biodegradables.

### **Recomendaciones**

En concordancia con los resultados obtenidos para la extracción de almidón y celulosa, se recomienda evaluar formulaciones bioplásticas que integren ambos biopolímeros, respaldadas por estudios recientes sobre biocompuestos almidón–celulosa. Diversos autores han demostrado que la reticulación con ácido cítrico mejora significativamente las propiedades mecánicas y reduce la solubilidad de los films almidón–celulosa (Miller et al., 2024; Hassan et al., 2020). Asimismo, investigaciones realizadas con celulosa proveniente de residuos agrícolas muestran que la combinación con plastificantes como glicerol o sorbitol, y

biopolímeros como quitosano, incrementa la cohesión interna y la estabilidad del material (Pormsila & Udomphoch, 2025; Putro et al., 2021).

A partir de esta evidencia se proponen las siguientes formulaciones:

**Formulación A — Almidón + Celulosa reticulada con ácido cítrico.**

$$FA = 6gA + 3gC + 3.5mLG + 0.6gAC + (H2O \rightarrow 100mL)$$

**Fuente:** Miller et al., 2024; Hassan et al., 2020

**Donde:**

- **A** = almidón de yuca
- **C** = celulosa extraída del tamo
- **G** = glicerina
- **AC** = ácido cítrico

Esta formulación permite generar una matriz reforzada y reticulada, con mayor resistencia a la tracción y menor solubilidad gracias a la formación de enlaces éster entre el almidón y la celulosa, tal como han reportado Miller et al. (2024) y Hassan et al. (2020).

**Formulación B — Almidón + Celulosa + Quitosano + Sorbitol.**

$$FB = 5gA + 4gC + 10mLQ(1\%) + 3mLS + (H2O \rightarrow 100mL)$$

**Fuente:**

**Donde:**

- **A** = almidón
- **C** = celulosa del tamo
- **Q (1%)** = solución de quitosano al 1%
- **S** = sorbitol

Esta formulación genera un biocompuesto con mayor cohesión, flexibilidad moderada y potenciales propiedades antimicrobianas aportadas por el



quitosano. Los resultados obtenidos por Pormsila & Udomphoch (2025) muestran que el uso conjunto de celulosa agrícola, sorbitol y quitosano mejora la integridad mecánica y la estabilidad del material.

### **Agradecimientos**

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a Dios por la fortaleza y sabiduría brindadas durante el desarrollo de esta investigación, y a nuestros padres, por su apoyo incondicional, comprensión y constante motivación a lo largo de todo el proceso académico.

De igual manera, extendemos un especial agradecimiento a nuestra Directora de Investigación Diana Marcela Camacho Docente de la Universidad de Cundinamarca, por su orientación, acompañamiento y respaldo en la ejecución del proyecto, contribuyendo al fortalecimiento del trabajo investigativo.

Finalmente, agradecemos a la Universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot, por el apoyo institucional brindado, así como por la disposición de los recursos, espacios y herramientas necesarias para la realización de los ensayos experimentales. Este trabajo se llevó a cabo en el marco del compromiso institucional con la formación investigativa y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales en la región del Alto Magdalena.

### **Declaración de conflicto de intereses**

En el presente proyecto de investigación no se presentó ningún tipo de contribución externa u otras que podría influenciar los resultados o hipótesis presentadas y dar lugar a conflicto de intereses.



## Referencias

- (1) Sonar, C., Al'-Ghamdi, S., & Marti, F. T. (2020). Performance evaluation of biobased/biodegradable films for in-package thermal pasteurization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66. Retrieved from (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856420304318>)
- (2) Punia S, Sandhu KS, Siroha AK, Dhull SB. Development of biodegradable packaging materials from agricultural residues: A review. *Food Packag Shelf Life*. 2022; 31:100788.
- (3) Maestre L. Implementación de la Ley 2232 de 2022 para la eliminación de plásticos de un solo uso en Colombia. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*; 2022.
- (4) Ruta de la Sostenibilidad. Producción limpia y reducción de plásticos en el Tolima. *Gobernación del Tolima*; 2023.
- (5) Correa Caicedo LD. Problemática ambiental asociada al manejo del tamo de arroz en el Alto Magdalena. *Rev. Ambien Cienc*. 2013;18(1):23–31.
- (6) Preciado-Saldaña L, Torres A, Ramírez J. Impacto de los residuos agrícolas en el suelo y el agua. *Rev. Agroambiental*. 2022;15(2):33–42.
- (7) Aillón Molina F, et al. Cultivos tradicionales en el Alto Magdalena. *Rev. Agron Colomb*. 1967;25(2):45–52.
- (8) SGC. Servicio Geológico Colombiano. Producción y aprovechamiento del almidón de yuca en Colombia. Bogotá D.C.; 2013.
- (9) FAO. El arroz y su importancia en la alimentación mundial. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; 2015 [citado 2025 oct 18]. Disponible en: <https://www.fao.org>



- (10) Sriroth K, Chotineerant S, Piyachomkwan K, Oates CG. The cassava starch granule: Structure and function. *Starch/Stärke*. 2006;58(10):469–80.
- (11) Spada JC, Delgado A, Nunes LM. Utilización de la celulosa del tamo de arroz en bioplásticos. *J Polym Environ*. 2020;28(3):945–58.
- (12) Keegstra K. Plant cell walls. *Plant Physiol*. 2010;154(2):483–6.
- (13) Martínez J, Pérez L. Métodos de extracción de celulosa del tamo de arroz. *Rev. Alimen*. 2022; [volumen(número)]: [páginas]. Disponible en: <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/alimen/article/download/1574/1676/4796>
- (14) Odoch M, Buys EM, Taylor JRN. Mechanism of cassava tuber cell wall weakening by dilute sodium hydroxide steeping. *Food Chem*. 2017; 228:338–47
- (15) Hernández I, Martínez M, Contreras R, Pérez R. Extracción de almidón por el método seco en plátano macho, cuadrado y castilla. *Rev. Simul Lab*. 2017;4(13):1–7
- (16) Ortega M. Elaboración de bioplástico a partir de residuos de arroz partido y paja de arroz [Trabajo de pregrado]. Universidad Tecnológica del Perú; 2019 [citado 2025 oct 18]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/2810>
- (17) Thongsomboon W, Baimark Y, Srihanam P. Valorization of cellulose-based materials from agricultural waste: Comparison between sugarcane bagasse and rice straw. *Polymers (Basel)*. 2023;15(15):3190. doi:10.3390/polym15153190.
- (18) Reddy N, Yang Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *Trends Biotechnol*. 2005;23(1):22–7.
- (19) Ogura I, Sugiyama M, Tai R, Mano H, Matsuzawa T. Optimization of microplate-based phenol–sulfuric acid method and application to the multi-



sample measurements of cellulose nanofibers. *Anal Biochem.* 2023; 681:115329.

doi:10.1016/j.ab.2023.115329.

(20) Corhuila. Aprovechamiento de residuos agrícolas en la producción de bioplásticos. Corporación Universitaria del Huila; 2019.

(21) Hernández LM, López CE, Vargas RA. Evaluación del método colorimétrico yodo–almidón en la determinación de polisacáridos naturales. *Rev Lat. Biotecnol Ambient Alim.* 2017;8(1):45–52.

(22) Rodríguez C, López M, Jiménez A. Optimización de la extracción de almidón de yuca mediante tratamientos alcalinos. *Rev Colomb Quím.* 2020;49(2):34–42.

(23) Tirado N, Ocampo L, Martínez A. Sustainable technology for the production of artisanal cassava starch. *ResearchGate*; 2022 [citado 2025 oct 18]. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/365297486\\_Sustainable\\_technology\\_for\\_the\\_production\\_of\\_artisanal\\_cassava\\_starch](https://www.researchgate.net/publication/365297486_Sustainable_technology_for_the_production_of_artisanal_cassava_starch)

(24) Rashwan, A. K., Younis, H. A., Chen, W., et al. (2024). Plant starch extraction, modification, and green applications: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01753-z>

(25) Lawal, O. S., & Adebawale, K. O. (2005). Physicochemical characteristics and thermal properties of chemically modified jack bean (*Canavalia ensiformis*) starch. *European Food Research and Technology*, 221, 631–638. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0032-z>

(26) Li Y, Gao P, Chen M, Liu T. Influence of combined acid and alkali treatments on the structure and yield of cellulose from bamboo. *Carbohydr Polym.* 2019; 216:72–80.



- (27) Zhou H, Li J, Wang X, et al. Acid–alkaline pretreatment for cellulose extraction from agricultural residues: effect on yield and purity. *Bioresour Technol.* 2021; 319:124214.
- (28) Gao P, Li Y, Chen M, Liu T. Effects of combined acid–alkali and heat treatment on the physicochemical structure of Moso bamboo. *Sci Rep.* 2020;10(1):7098. doi:10.1038/s41598-020-63847-2.
- (29) Sánchez DF, Mora JC. Evaluación de la reproducibilidad en la determinación espectrofotométrica de almidones naturales mediante el método yodo–colorimétrico. *Rev Cienc Ing.* 2019;15(3):37–46.
- (30) Abioye OP, Adeyemi IA, Akinoso R. Effect of extraction methods on the physicochemical and functional properties of starch obtained from cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *J Food Meas Charact.* 2018;12(2):1129–38. doi:10.1007/s11694-017-9721-9.
- (31) Rincón JP, Díaz E, Castro ML. Comparative study of starch extraction methods and their effect on analytical variability in spectrophotometric quantification. *Food Anal Methods.* 2020;13(7):1502–12. doi:10.1007/s12161-019-01699-2.
- (32) González CA, Pérez MD, Contreras AF. Optimización del proceso de extracción de almidón a partir de residuos agroindustriales mediante tratamiento alcalino. *Rev Colomb Mater Procesos.* 2021;9(2):45–56.
- (33) González M, Morales D. Efecto de los tratamientos alcalinos sobre la purificación de celulosa en materiales lignocelulósicos. *Rev Colomb Mater.* 2021;12(3):45–54.

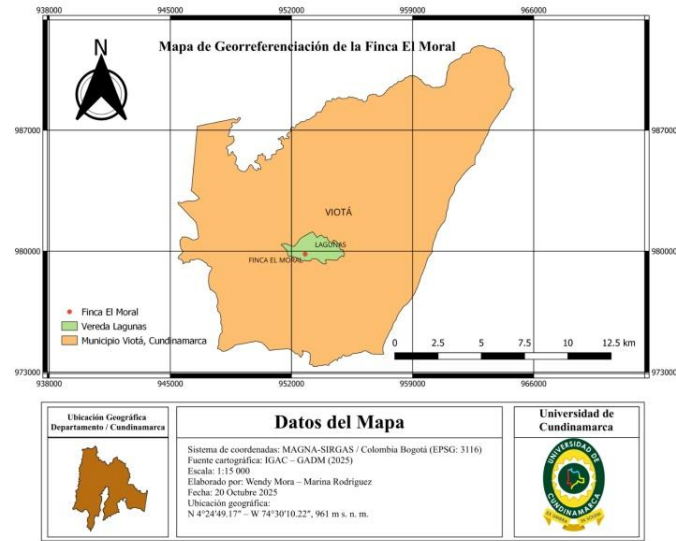


- (34) Sharma R, Kaur R, Singh M. Enhancement of cellulose extraction efficiency through alkaline and oxidative pretreatments of rice husk. *Biomass Convers Biorefin.* 2020;10(3):589–600.
- (35) Putro JN, Kurniawan A, Ismadji S. Improvement of cellulose purity and crystallinity through alkaline pretreatment of lignocellulosic biomass. *Ind Crops Prod.* 2019;137:1–10
- (36) Szymańska-Chargot M, Cybulska J, Zdunek A. Pre-treatment effects on cellulose structure and measurement reproducibility in lignocellulosic biomass. *Cellulose.* 2017;24(5):1881–9.
- (37) Mwaikambo LY, Ansell MP. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *J Appl Polym Sci.* 2002;84(12):2222–34..
- (38) Sayanjali S, Ghaffari-Moghaddam M, Rahmani Z, Ghasemi JB. Extraction and characterization of cellulose from broccoli (*Brassica oleracea* L.) residues. *Polymers (Basel).* 2024;16(1):123. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11052598/>
- (39) Edinburgh Instruments. The Beer–Lambert law: Transmittance & absorbance [Internet]. Livingston (UK): Edinburgh Instruments; 2021 Jul 8 [citado 2025 oct 30]. Disponible en: <https://www.edinst.com/resource/the-beer-lambert-law/>
- (40) Hassan, M. M., Frollini, E., Rosa, D. S., & El-Wakil, N. A. (2020). Thermal, mechanical and swelling behavior of citric acid–crosslinked starch/cellulose biocomposites. *Materials Science Forum*, 1010, 514–520. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1010.514>



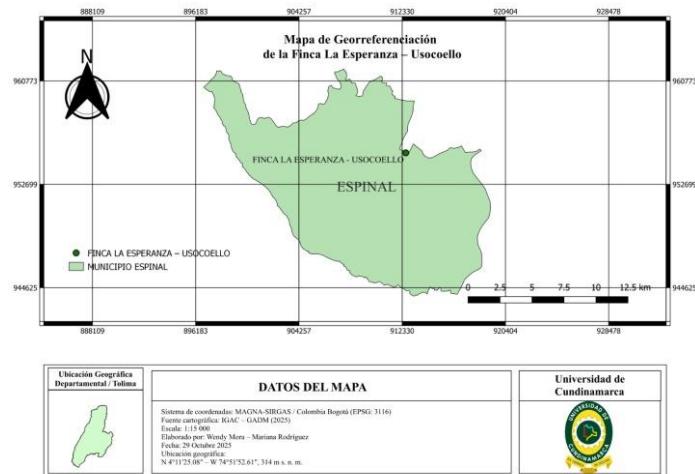
- (41) Miller, K., Aydemir, D., & Budinová, T. (2024). Impact of citric acid on the structure, barrier, and tensile properties of starch–cellulose composite films. *Polymers*, 16(9), 1290. <https://doi.org/10.3390/polym16091290>
- (42) Pormsila, W., & Udomphoch, M. (2025). Synthesis and application of bioplastic from rice-husk-derived cellulose citrate using sorbitol and chitosan plasticizers. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 18(2), 221–230. <https://doi.org/10.18280/ijdne.180222>
- (43) Putro, J. N., Kurniawan, A., & Sunarso, J. (2021). Development of cellulose-based bioplastics from agricultural residues reinforced with chitosan and sorbitol. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 9(1), 15–24. <https://doi.org/10.33394/hjkk.v9i1.13821>
- (44) Miller, K., & Torres, A. (2022). Crosslinked starch-coated cellulosic papers as alternative packaging materials. *RSC Advances*, 12(4), 2531–2540. <https://doi.org/10.1039/D2RA00536K>

## FIGURAS



**Fig. 1.** Ubicación del municipio de Viotá en el departamento de Cundinamarca

**Fuente:** Elaboración propia



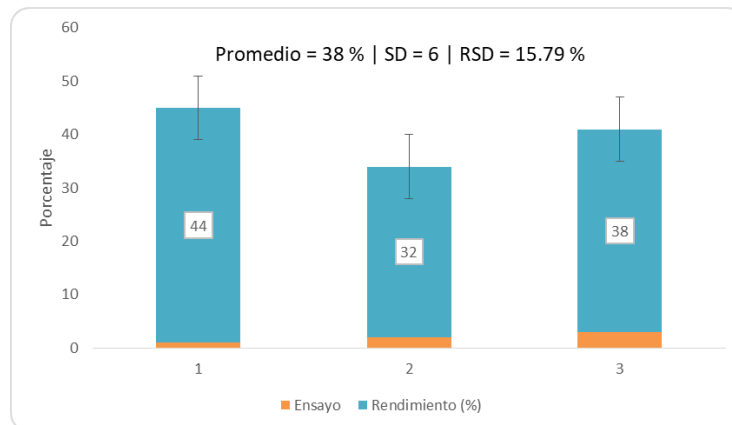
**Fig. 2.** Ubicación del municipio del Espinal en el departamento de Tolima

**Fuente:** Elaboración propia

$$R(\%) = \frac{W_e}{W_t} \times 100$$

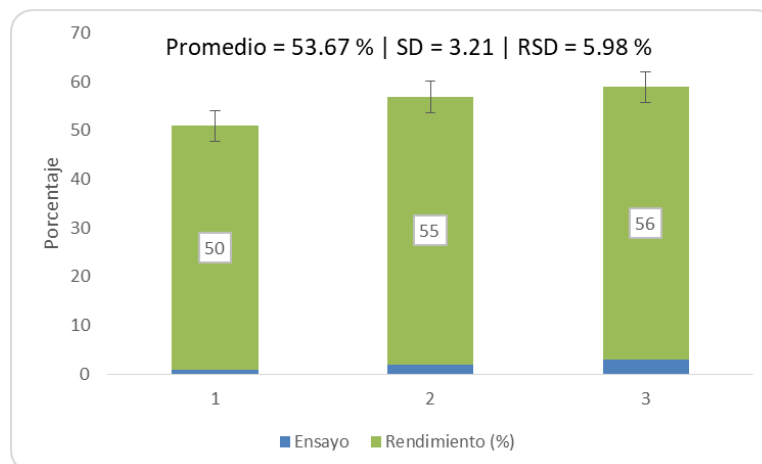
**Fig. 3.** Ecuación para el cálculo del rendimiento de extracción.

**Fuente:** Sayanjali (36)



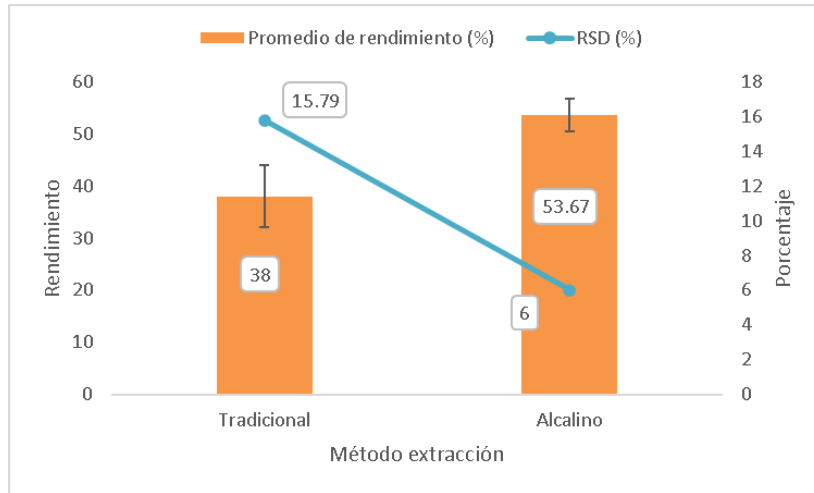
**Fig. 4.** Resultados estadísticos del porcentaje de rendimiento del almidón de yuca utilizando el Tratamiento 1: Método tradicional.

**Fuente:** Elaboración propia.



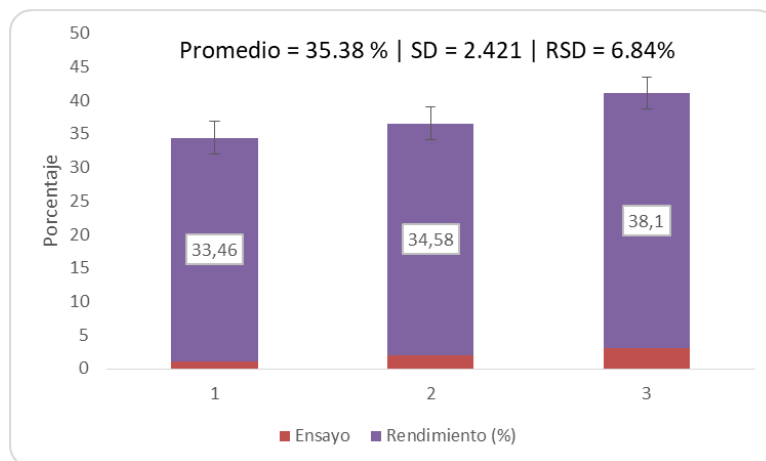
**Fig. 5.** Resultados estadísticos del porcentaje de rendimiento del almidón de yuca utilizando el Tratamiento 2: Método alcalino.

**Fuente:** Elaboración propia.



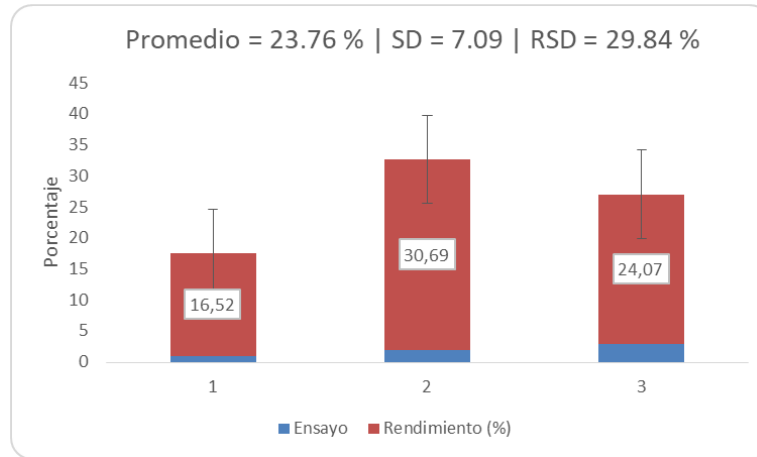
**Fig. 6.** Comparación del rendimiento de extracción de almidón por método tradicional y alcalino.

**Fuente:** Elaboración propia.



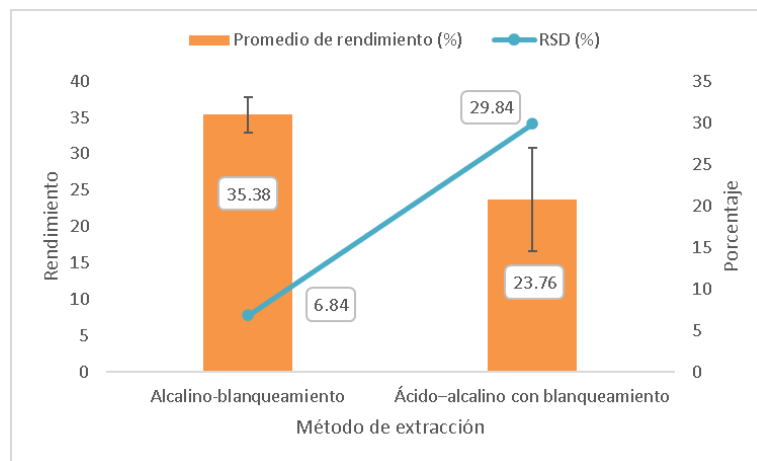
**Fig. 7.** Resultados estadísticos del porcentaje de rendimiento del tamo de arroz utilizando el Tratamiento 1: Alcalino-blanqueamiento.

**Fuente:** Elaboración propia.



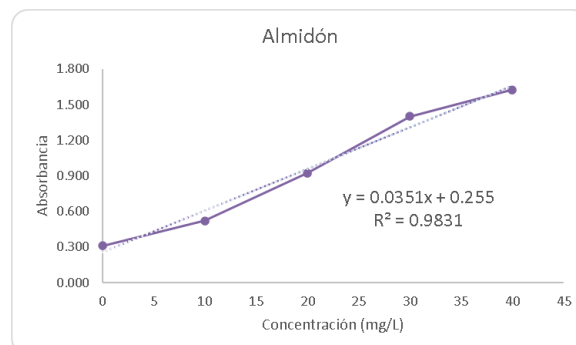
**Fig. 8.** Resultados estadísticos del porcentaje de rendimiento del tamo de arroz utilizando el Tratamiento 2: ácido–alcalino con blanqueamiento.

**Fuente:** Elaboración propia.



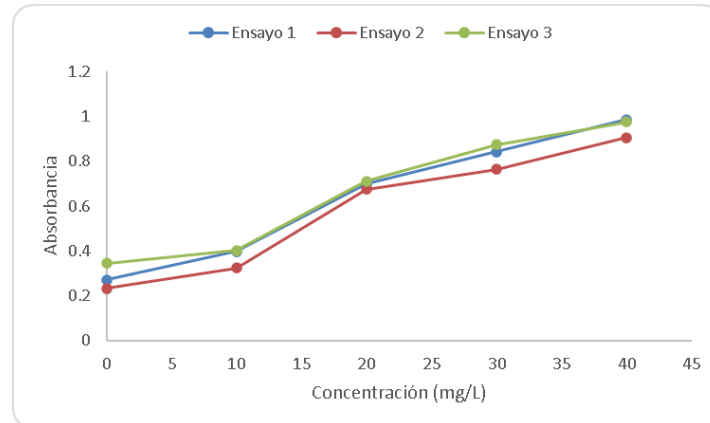
**Fig. 9.** Comparación del rendimiento de extracción de celulosa del tamo de arroz por método alcalino-blanqueamiento y ácido–alcalino con blanqueamiento.

**Fuente:** Elaboración propia.



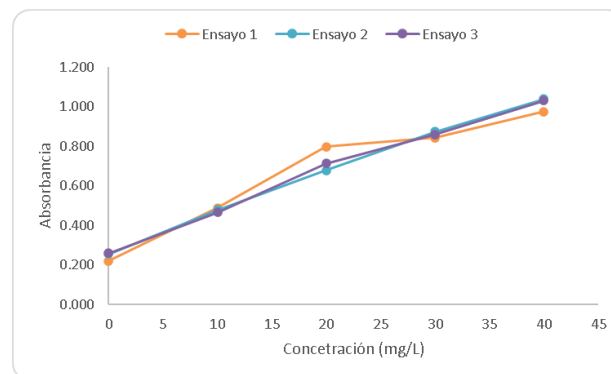
**Fig. 10.** Curva de calibración obtenida a partir del material sintético de almidón

**Fuente:** Elaboración propia.



**Fig. 11.** Resultados de los tres ensayos de extracción de almidón tratamiento 1: método tradicional.

**Fuente:** Elaboración propia



**Fig. 12.** Resultados de los tres ensayos de extracción de almidón tratamiento 2: método alcalino.

**Fuente:** Elaboración propia.

$$A = \epsilon cl$$

$A$	Absorbance	
$\epsilon$	Molar absorption coefficient	$M^{-1}cm^{-1}$
$c$	Molar concentration	M
$l$	optical path length	cm

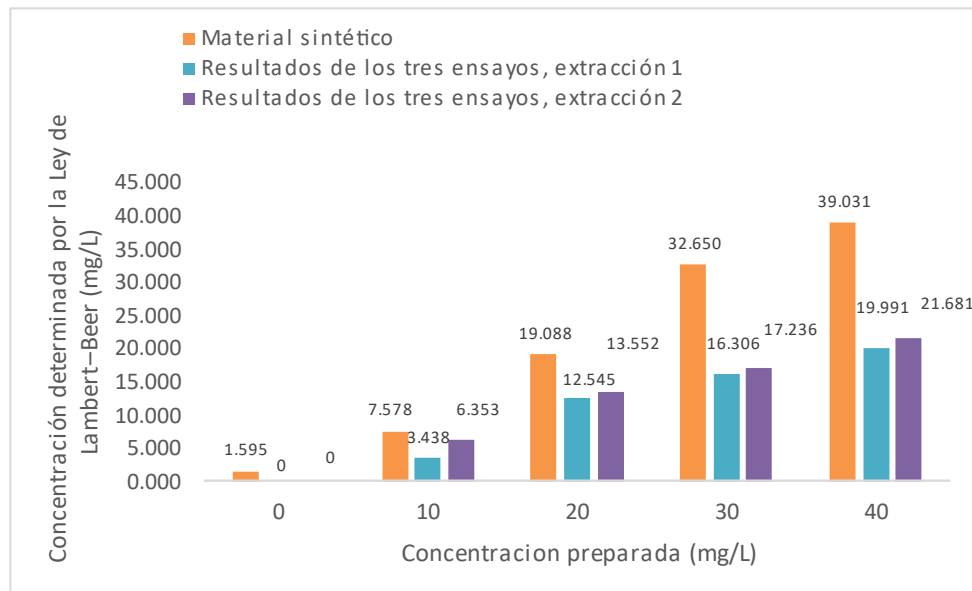
**Fig. 13.** Ley de Lambert

**Fuente:** Edinburgh Instruments (37)

$$C = \frac{A - 0.6281}{0.0599}$$

**Fig. 14.** Ley de Lambert despejada la concentración con los datos de la curva de calibración realizada con el almidón de yuca.

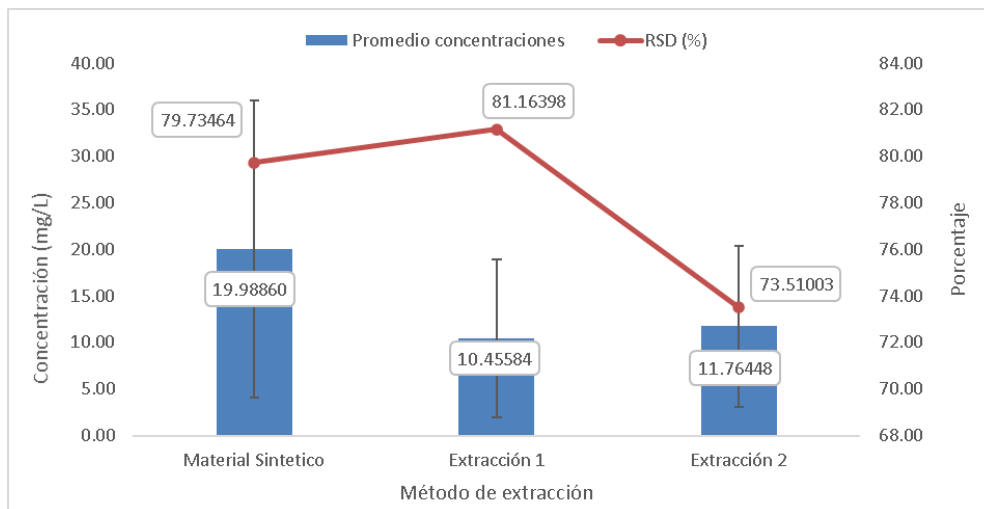
**Fuente:** Elaboración propia



**Fig. 15.** Relación entre la concentración preparada y la concentración determinada por la Ley de Lambert–Beer para el material sintético y las

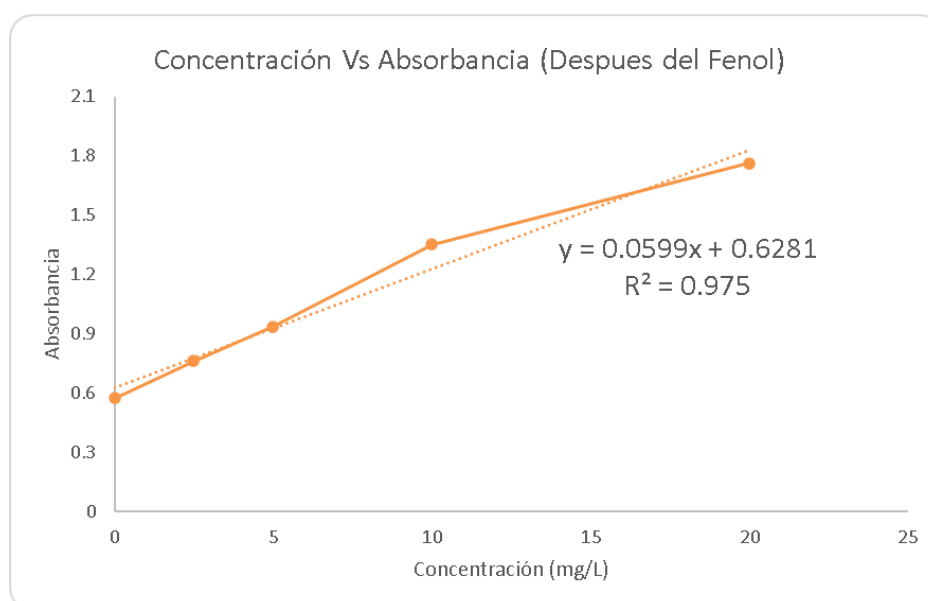
muestras obtenidas mediante los métodos de extracción 1 y 2 de almidón de yuca.

**Fuente:** Elaboración propia



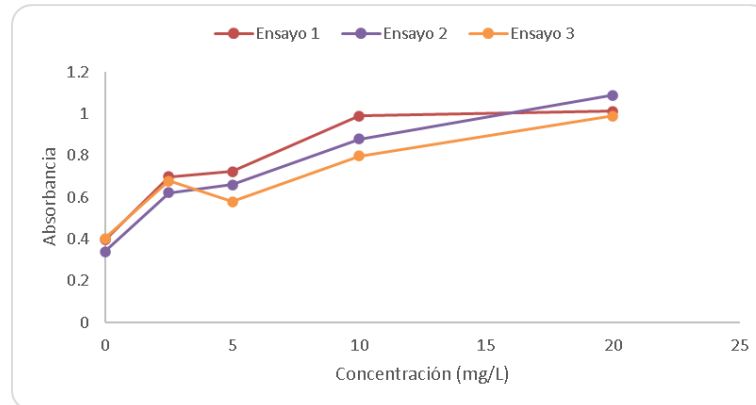
**Fig. 16.** Comparación de los resultados de concentración y RSD (%) de los métodos de extracción 1 y 2, almidón de yuca según la concentración determinada por la Ley de Lambert.

**Fuente:** Elaboración propia.



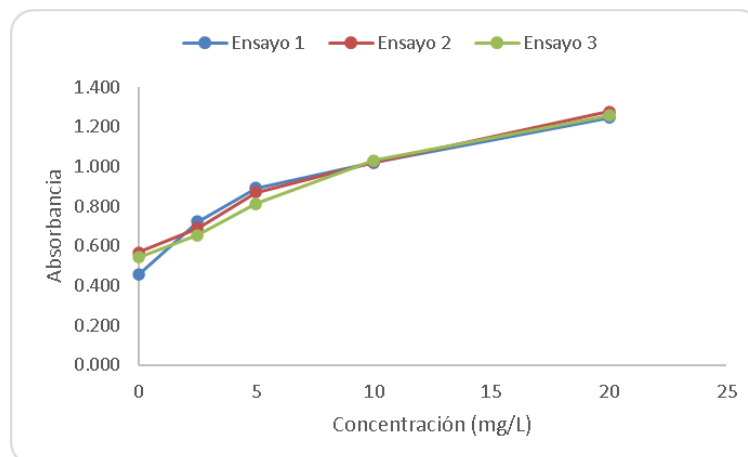
**Fig. 17.** Curva de calibración obtenida a partir del material sintético de celulosa

**Fuente:** Elaboración propia.



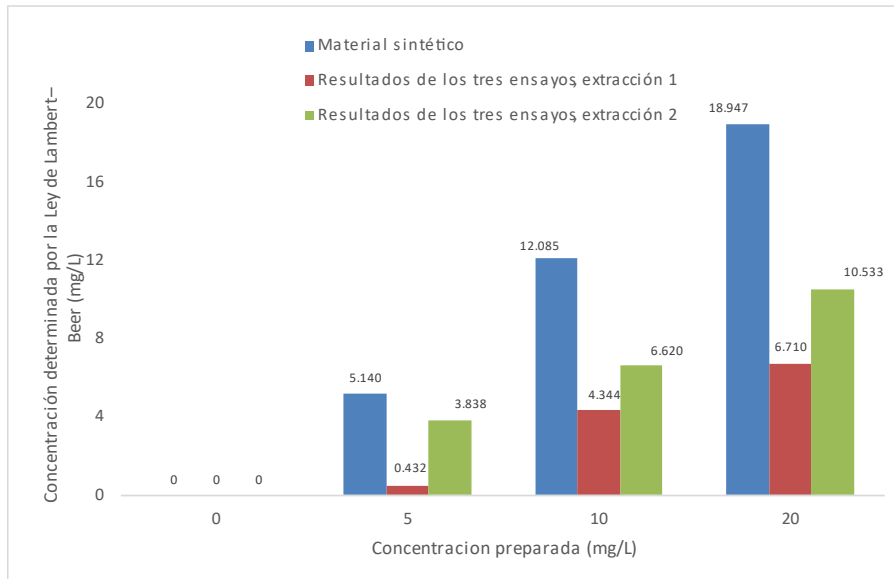
**Fig. 18.** Resultados de los tres ensayos extracción de celulosa, tratamiento 1 alcalino–blanqueamiento

**Fuente:** Elaboración propia



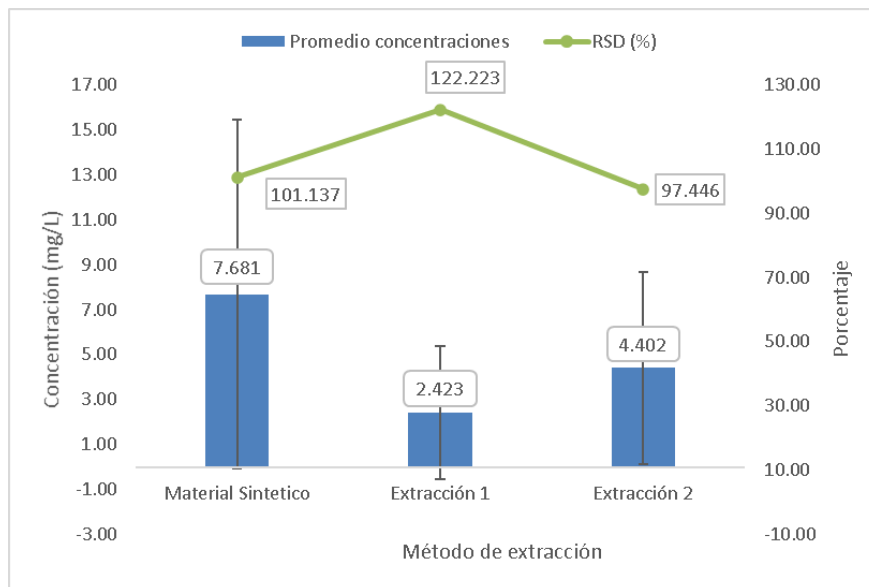
**Fig. 19.** Resultados de los tres ensayos extracción de celulosa, tratamiento 2 ácido–alcalino con blanqueamiento

**Fuente:** Elaboración propia



**Fig. 20.** Relación entre la concentración preparada y la concentración determinada por la Ley de Lambert–Beer para el material sintético y las muestras obtenidas mediante los métodos de extracción 1 y 2, celulosa de tamo de arroz.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Fig. 21.** Comparación de los resultados de concentración y RSD (%) de los métodos de extracción 1 y 2, celulosa de tamo de arroz según la concentración determinada por la Ley de Lambert.

**Fuente:** Elaboración propia.

## TABLAS

**Tabla 1.** Rendimiento experimental del almidón de yuca (*Manihot Esculenta*) obtenido mediante el Tratamiento 1 (método tradicional).

La tabla presenta los valores de peso inicial y final de las muestras procesadas de yuca, así como el rendimiento porcentual calculado según la relación entre masa final y masa inicial. Este método corresponde al procedimiento convencional de extracción, empleado como control experimental. En la leyenda se explican las abreviaturas utilizadas: g = gramos; % = porcentaje.

<b>Ensayo</b>	<b>Peso inicial</b>	<b>Peso final</b>	<b>Rendimiento</b>
	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(%)</b>
1	150	66	44
2	150	48	32
3	150	57	38

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 2.** Rendimiento experimental del almidón de yuca (*Manihot Esculenta*) obtenido mediante el Tratamiento 2 (método alcalino).

La tabla muestra los resultados obtenidos al aplicar una solución alcalina de NaOH al 0,75 % sobre la yuca, evidenciando el incremento en el rendimiento porcentual respecto al método tradicional. Los valores se expresan en gramos (g) y porcentajes (%). En la leyenda se explican las abreviaturas utilizadas: g = gramos; % = porcentaje.

<b>Ensayo</b>	<b>Peso inicial</b>	<b>Peso final</b>	<b>Rendimiento</b>
	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(%)</b>
1	150	75	50
2	150	82,5	55
3	150	84	56

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.** Resultados del pesaje final (g) de las muestras de tamo de arroz (*Oryza sativa L.*) Tratadas con diferentes concentraciones de NaOH en los tres tratamientos.

La tabla presenta los valores de peso final obtenidos para cada tratamiento (T1, T2 y T3) luego de aplicar soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) a concentraciones de 5 %, 8 % y 10 %. En la leyenda se explican las abreviaturas utilizadas: g = gramos; % = porcentaje.

<b>Tratamiento</b>	<b>5 %</b>	<b>8%</b>	<b>10%</b>
	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(%)</b>
1	6,691	4,595	5,864
2	6,915	6,159	5,929
3	7,621	6,398	5,854

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 4.** Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de un factor aplicado a las concentraciones obtenidas mediante la Ley de Lambert por los diferentes métodos de extracción de almidón de yuca.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8617.83776	2	4308.918878	210.599	0.000002771	5.14325285
Dentro de los grupos	122.761806	6	20.46030107			
<b>Total</b>	<b>8740.59956</b>	<b>8</b>				

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 5.** Rendimiento experimental de la extracción de celulosa mediante el Método 1: Tratamiento alcalino–blanqueamiento.

La tabla presenta los resultados del rendimiento porcentual de celulosa obtenida a partir del tamo de arroz (*Oryza sativa L.*) usando el tratamiento alcalino–blanqueante (NaOH + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Se comparan tres ensayos experimentales correspondientes a diferentes concentraciones de NaOH. En la leyenda se explican las abreviaturas utilizadas: g = gramos; % = porcentaje.

Ensayo (muestra T3)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Rendimiento (%)
1	20	6,691	33,46
2	20	6,915	34,58
3	20	7,621	38,10

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 6.** Rendimiento experimental de la extracción de celulosa mediante el Método 2: Tratamiento ácido–alcalino con blanqueamiento.

Se presentan los resultados del rendimiento porcentual obtenido a partir del tamo de arroz tratado secuencialmente con ácido clorhídrico (HCl), hidróxido de sodio (NaOH) e hipoclorito de sodio (NaClO). Los datos evidencian la variación entre ensayos y la influencia del tratamiento combinado en la recuperación de celulosa. En la leyenda se explican las abreviaturas utilizadas: g = gramos; % = j porcentaje.

<b>Ensayo</b>	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
1	5	0,8259	16,52
2	5	1,5345	30,69
3	5	1,2037	24,07

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 7.** Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de un factor aplicado a las concentraciones obtenidas mediante la Ley de Lambert para los diferentes métodos de extracción de celulosa del tamo de arroz.

<b>Origen de las variaciones</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Promedio de los cuadrados</b>	<b>F</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Valor crítico para F</b>
Entre grupos	20813.62611	2	10406.81306	162.6845	0.000005936	5.14325285
Dentro de los grupos	383.8158638	6	63.96931064			
<b>Total</b>	<b>21197.44197</b>	<b>8</b>				

**Fuente:** Elaboración propia



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Protocolo estandarizado para la extracción de almidón y celulosa.

El presente protocolo consolida las condiciones óptimas determinadas en este estudio para la obtención de biopolímeros a partir de residuos vegetales. Incluye los parámetros de concentración, temperatura, tiempo, lavado y secado, así como la ecuación para el cálculo del rendimiento de extracción (**ver Figura 3**).

#### UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

#### FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

#### PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL

### PROTOCOLO ESTANDARIZADO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot Esculenta*) Y CELULOSA A PARTIR DE TAMO DE ARROZ (*Oryza sativa*)

**Método seleccionado:** Tratamiento 2

**Autores:** Wendy Mora - Mariana Rodríguez

**Fecha:** // \_\_\_\_ Girardot - Cundinamarca

#### 1. Alcance

Este protocolo describe, paso a paso, la metodología para la extracción de almidón de yuca y celulosa del tamo de arroz, aplicando los Tratamientos 2 (alcalino para almidón; ácido–alcalino con blanqueamiento para celulosa), tal como se emplearon experimentalmente en el laboratorio. Está diseñado para escala de laboratorio (50–500 g) y para su estandarización y validación.



## **2. Seguridad y equipo de protección personal (EPP)**

Usar bata, guantes resistentes a químicos (nitrilo), protección ocular y mascarilla cuando sea necesario. Manipular NaOH, HCl, NaClO o solventes en campana extractora. Consultar las hojas de seguridad (SDS/FDS) de cada reactivo. Neutralizar soluciones antes de su descarga y separar efluentes según normativa ambiental.

## **3. Preparación general de muestras**

**3.1 Trazabilidad:** Registrar código, procedencia, fecha de recolección, condiciones de almacenamiento y humedad inicial (determinada en estufa a 105 °C).

**3.2 Limpieza y acondicionamiento:** Lavar con agua corriente y enjuagar con agua destilada. Secar si se requiere trabajar en base seca. Moler y tamizar a 300  $\mu\text{m}$ .

## **4. Protocolo detallado de extracción de almidón (Tratamiento 2 – método alcalino)**

**Referencia base:** Odoch (14) y procedimiento experimental realizado en laboratorio.

**Escala de trabajo por ensayo:** 150 g de muestra fresca/molida (corregida a base seca).

### **Reactivos y soluciones:**

- Solución NaOH 0,75 % (p/p): 7,5 g de NaOH en 1 L de agua.
- Agua destilada.



### **Parámetros experimentales:**

- **Temperatura:** 25 °C.
- **Tiempo de reposo inicial:** 1 h.
- **Trituración:** 1 min (pulsos 30 s baja / 30 s alta).
- **Ensayos de lavado:** 5.
- **Sedimentación:** 2 h.
- **Secado:** 50 °C, 24 h.

### **Procedimiento:**

1. Pesar 150 g de yuca y registrar la masa.
2. Preparar 150 mL de NaOH al 0,75 %.
3. Mezclar y mantener en reposo 1 h a 25 °C.
4. Triturar durante 1 min (pulsos alternos).
5. Suspender en agua (5x volumen), moler nuevamente y tamizar; repetir cinco veces.
6. Dejar reposar 2 h para sedimentación.
7. Decantar sobrenadante y recuperar el precipitado.
8. Lavar con agua destilada hasta pH neutro.
9. Secar en horno a 50 °C durante 24 h.
10. Tamizar y envasar el producto final.
11. Registrar masa final y rendimiento másico

### **Mejoras propuestas:**

- Estandarizar la relación sólido/líquido a 1:10, garantizando una mezcla homogénea y menor formación de grumos durante la trituración.



- Controlar el pH de lavado hasta valores cercanos a 7, asegurando la eliminación completa del NaOH residual y mejorando la pureza del almidón.
- Evaluar el tiempo óptimo de reposo y sedimentación, ya que se observó que un reposo mayor a 2 horas favorece una mejor separación de fases.
- Implementar un registro sistemático de temperatura ambiental y tiempos de procesamiento para correlacionar su influencia sobre el rendimiento final.

### **5. Protocolo detallado de extracción de celulosa (Tratamiento 2 – método ácido–alcalino con blanqueamiento)**

**Referencia base:** Thongsomboon (17) y procedimiento experimental en laboratorio.

**Escala de trabajo por ensayo: 5–100 g.**

#### **Reactivos y soluciones:**

- Hexano (pretratamiento).
- HCl 15 % (v/v).
- NaOH 20 % (p/p).
- NaClO 15 %.
- Agua destilada.

#### **Parámetros experimentales:**

- **Pretratamiento: hexano:** 1 h, 50 mL/5 g muestra.
- **Hidrólisis ácida:** HCl 15 %, 80 °C, 45 min, 250 rpm.
- **Tratamiento alcalino:** NaOH 20 %, 80 °C, 45 min, 250 rpm.
- **Blanqueo:** NaClO 15 %, 80 °C, 45 min, 180 rpm.
- **Secado:** 60 °C, 24 h.



### Procedimiento:

1. Pesar la muestra (5–100 g).
2. Remojar en hexano 1 h; filtrar.
3. Hidrólisis con HCl 15 % a 80 °C durante 45 min.
4. Lavar hasta pH neutro.
5. Tratamiento con NaOH 20 % a 80 °C por 45 min.
6. Lavar hasta pH neutro.
7. Blanqueo con NaClO 15 % bajo las mismas condiciones.
8. Lavar hasta pH neutro.
9. Secar en horno a 60 °C por 24 h.
10. Pesar y almacenar el producto seco.

### Mejoras propuestas:

- Sustituir NaClO por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (5–10 %) para reducir residuos clorados.
- Controlar temperatura y tiempos para evitar degradación.
- Implementar lavados adicionales si se detectan sales residuales.
- En escalas mayores, aplicar pretratamientos mecánicos.

## 6. Control de calidad y recomendaciones analíticas

El rendimiento másico se calcula según:

$$R(\%) = \frac{W_e}{W_t} \times 100$$

**Fuente:** Adaptado de Sayanjali *et al.*15.

**Donde:**

- **We** = peso del extracto seco obtenido (almidón o celulosa).
- **Wt** = peso de la muestra seca inicial.



Registrar humedad inicial y final. Realizar mínimo tres réplicas y calcular media y desviación estándar.

## 7. Manejo de residuos y seguridad ambiental

Neutralizar soluciones ácidas y alcalinas antes de su descarga. Evitar vertidos directos de hipocloritos. Separar residuos orgánicos y disponerlos según normativa institucional.

## 8. Anexos

### Anexo A. Hoja de registro de extracción.

Código muestra	Origen	Masa (Inicial (g))	Humedad (%)	Método	Parámetros clave	Masa producto seco (g)

## 9. Firmas

Elaboró: \_\_\_\_\_ Fecha: //\_\_\_\_\_  
Revisó: \_\_\_\_\_ Fecha: //\_\_\_\_\_  
Aprobó: \_\_\_\_\_ Fecha: //\_\_\_\_\_