



TRABAJO DE GRADO
UNIVERSIDAD DEL VALLE

**EVALUACIÓN DE TASAS DE DIFUSIÓN ENTRE PROTEÍNA MODELO Y ALMIDÓN
DE RESIDUOS POSTCOSECHA DEL PLÁTANO MACHO.**

MARÍA CAMILA FRANCO CORTES

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA
2025**



TRABAJO DE GRADO
UNIVERSIDAD DEL VALLE

**EVALUACIÓN DE TASAS DE DIFUSIÓN ENTRE PROTEÍNA MODELO Y ALMIDÓN
DE RESIDUOS POSTCOSECHA DEL PLÁTANO MACHO.**

MARÍA CAMILA FRANCO CORTES

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

DIRECTOR:
JOSÉ SEBASTIÁN LÓPEZ VÉLEZ, Ph.D.

CODIRECTOR:
ADRIANA KATERINE NIÑO VARGAS, Ph.D.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA
2025**

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de grado inicialmente a mis padres, Diana y Diego, por su apoyo incondicional en este proceso de formación. Especialmente a mi papá que desde la distancia siempre ha estado al pendiente de nuestro camino y lo que conlleva la vida educativa y a mi mamá por estar siempre al tanto de cómo transcurrían los días en las fases experimentales, por escucharme con detenimiento de qué se trataba el proyecto en sí y aconsejarme emocionalmente para continuar resiliente. Gracias por ser aquellos que me motivaron a seguir obteniendo conocimiento y aplicarlo como mejor se debe. Los aprecio muchísimo y espero que los frutos de este gran esfuerzo lo podamos compartir, porque este logro también es de ustedes.

Por otra parte, quisiera mencionar a mi hermana Sofía, que siempre me escuchó y estuvo atenta de mis movimientos en este gran proceso. Por ser una motivación para dar ejemplo de constancia, disciplina y resiliencia.

Del mismo modo, quisiera dedicar este trabajo a mis abuelos, José Alirio y Luz Mary, que son la luz de mis ojos. Gracias por apoyarme en el camino de la vida, por criarme en cuanto a mis valores, por enseñarme lo mucho que saben llevar la vida y explicarme con tranquilidad y sutileza cada cuestión importante. También agradecerle a mis familiares Gloria Stella, Paola Andrea, Olga y Alcides, por estar presentes y expectantes en cuanto al proceso. Fueron de gran apoyo.

No obstante, quisiera dedicar este logro a mi mascota Apolo, que siempre se pasaba junto a mi lado cuando planeaba el proyecto. Aunque no lo crean, siempre me sacaba una sonrisa que me ayudaba a continuar.

Finalmente, quiero dedicar este proyecto a la persona más increíble del mundo, Juan Camilo Calambás. No tengo palabras para agradecer el apoyo infinito recibido tras el proceso del trabajo de grado y la carrera profesional en general, por lo tanto, mi logro es tuyo también. Gracias por siempre estar pendiente de mi bienestar, por creer más que nadie en mí, por impulsar mi potencial y pensar en lo mejor en cuanto al futuro del proyecto. Gracias por ser parte de mi vida y por querer seguir fortaleciendo nuestro conocimiento en conjunto. Te amo infinitamente.

María Camila Franco Cortes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Universidad del Valle y a la Escuela de Ingeniería Química por brindarme las bases académicas, el espacio y los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto. Este trabajo representa el fruto del esfuerzo, la perseverancia y el aprendizaje adquirido a lo largo de mi formación profesional.

Expreso mi sincera gratitud a mis directores de proyecto, José Sebastián López y Adriana Katherine Niño, por su guía constante, su disposición para orientarme en cada etapa y por su compromiso con el desarrollo de esta investigación. Sus aportes académicos, su experiencia y su confianza fueron fundamentales para la construcción de este trabajo, ayudándome a comprender con mayor profundidad los desafíos y oportunidades que implica la investigación científica.

También deseo agradecer a las monitoras del laboratorio, por su apoyo y dedicación durante el proceso experimental. De manera muy especial, a Nhora Suatena, por su infinita paciencia al explicar el uso de los equipos, por su acompañamiento constante, su buena disposición ante cada duda y su calidez humana. Gracias por transmitir tranquilidad incluso en los momentos más difíciles y por ser una guía fundamental en el desarrollo práctico de esta investigación.

A Juan Camilo Calambás, compañero de estudio, le extiendo un agradecimiento muy especial por su colaboración durante toda la etapa experimental. Su compromiso, apoyo incondicional y disposición para ayudar en todo momento fueron indispensables. Gracias por ofrecerme siempre una mano cuando las cosas se complicaron, por compartir sus conocimientos y por su actitud colaborativa que hizo mucho más ameno y enriquecedor todo el proceso.

Asimismo, expreso un profundo agradecimiento a Don Mister, por su amabilidad y disposición al suministrar en repetidas ocasiones la materia prima necesaria para el proyecto, sin dudar en ofrecer su ayuda. Gracias por sus valiosas explicaciones sobre el cultivo del plátano y por su interés genuino en las posibilidades de aprovechamiento de los residuos agroindustriales. Su colaboración refleja el valor del trabajo conjunto entre la academia y la comunidad.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este camino. A quienes brindaron su tiempo, sus palabras de aliento o su apoyo silencioso, gracias por acompañarme en este proceso que, más allá del resultado, me deja grandes aprendizajes y una profunda gratitud hacia todos los que creyeron en mí.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar la difusión entre almidones obtenidos de residuos poscosecha del plátano macho (cáscara y tallo) y una proteína modelo, con el fin de comprender su comportamiento hidrodinámico y su potencial aplicación en sistemas bio-coloidales. Con ello, el estudio se enmarca en el aprovechamiento de subproductos agroindustriales como estrategia de valorización sostenible y contribución a la economía circular, mediante la obtención de biopolímeros funcionales a partir de materiales que usualmente son descartados.

Se realizó la extracción y caracterización general de los almidones provenientes de ambos residuos, lo que permitió identificar diferencias estructurales relevantes que influyen en su estabilidad coloidal y en su respuesta con condiciones hidrodinámicas controladas. Posteriormente, se evaluó el comportamiento difusivo de los almidones y de la proteína en diferentes valores de pH, utilizando modelos teóricos de difusión para determinar sus parámetros hidrodinámicos. A partir de este análisis se identificaron condiciones en las que fue posible estimar difusividades binarias consistentes, necesarias para describir sistemas multicomponentes mediante la relación de conversión Fick- Maxwell- Stefan válida en el límite diluido.

Los resultados obtenidos permiten establecer relaciones entre la estructura de los biopolímeros naturales, su estabilidad en suspensión y su movilidad molecular, aportando herramientas para el entendimiento de interacciones en matrices biológicas complejas. En conjunto, este estudio demuestra el potencial de los residuos agroindustriales como fuente de macromoléculas útiles y ofrece una base conceptual para el desarrollo de modelos de transporte aplicables a sistemas naturales y tecnologías basadas en biomateriales.

Palabras clave: Almidón de desechos del plátano, hidrodinámica coloidal, modelos hidrodinámicos, difusión en sistemas macromoleculares, interacciones proteína - almidón, difusividad Maxwell Stefan, economía circular, valorización de residuos agroindustriales.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. OBJETIVOS.....	14
4.1 Objetivo general.....	14
4.2 Objetivos específicos.....	14
5. MARCO CONCEPTUAL.....	15
5.1 Almidón.....	15
5.2 Industria de almidón en Colombia.....	16
5.3 Residuos agroindustriales de plátano en Colombia.....	17
5.4 Caracterización de almidón y residuos del plátano.....	18
5.5 Proteínas en solución.....	19
5.6 Albúmina (Proteína modelo).....	20
5.7 pH y comportamiento de macromoléculas.....	20
5.8 Solubilidad y estabilidad coloidal de macromoléculas.....	21
5.9 Interacciones proteína-polisacárido.....	21
5.10 Difusión macromolecular.....	22
5.11 Fenómenos de transferencia de masa.....	22
5.12 Dispersión de Luz dinámica (DLS) y Potencial Zeta (ζ).....	23
6. ANTECEDENTES.....	24
7. METODOLOGÍA.....	26
7.1 Recolección de materia Prima.....	26
7.2 Pretratamiento de materia prima.....	26
7.3 Aislamiento de almidón de residuos poscosecha de plátano.....	26
7.4 Verificación de obtención de almidón con reactivo Lugol.....	27
7.5 Caracterización fisicoquímica y tecnofuncional de almidones de desechos poscosecha del plátano macho.....	27
7.5.1 Contenido de humedad.....	27
7.5.2 Índice de blancura.....	28
7.5.3 Espectroscopía Infraroja por transformada de Fourier (FTIR).....	28
7.5.4 Determinación de pH.....	28
7.5.5 Determinación de solubilidad de almidones.....	28
7.5.6 Determinación de Poder de Hinchamiento de almidones.....	29
7.5.7 Determinación de capacidad de absorción en almidones.....	29
7.5.8 Determinación de temperatura de gelatinización.....	29
7.6 Caracterización coloidal: DLS y Potencial Zeta.....	29
7.6.1 Preparación de soluciones buffer y verificación de pH.....	30
7.6.2 Preparación de suspensiones para análisis.....	30

7.6.3 Dispersión de Luz dinámica (DLS).....	30
7.6.4 Potencial Zeta.....	32
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
8.1 Aislamiento de almidones de tallo y cáscara de plátano macho.....	32
8.2 Verificación de obtención de almidón de tallo y cáscara de plátano mediante reactivo Lugol.....	33
8.3 Caracterización fisicoquímica y tecnofuncional de almidón de tallo y cáscara de plátano.....	33
8.3.1 Determinación de contenido de humedad.....	33
8.3.2 Determinación de índice de blancura.....	34
8.3.3 Tamaño de partícula.....	35
8.3.4 Espectroscopía de transformada de Fourier (FTIR).....	36
8.3.5 Determinación de pH.....	37
8.3.6 Determinación de solubilidad en almidones de tallo y cáscara de plátano.....	37
8.3.7 Determinación de poder de hinchamiento de almidones de tallo y cáscara de plátano..	38
8.3.8 Determinación de capacidad de absorción de almidones extraídos de desechos del plátano macho.....	40
8.3.9 Determinación de temperatura de gelatinización de almidones extraídos de desechos del plátano macho.....	40
8.4 Mediciones de tasas de difusión y Potencial Zeta entre almidón de tallo-Cáscara, solución buffer y Albúmina de huevo.....	41
8.4.1 Medición de potencial zeta entre muestras de almidones extraídos de desechos del plátano macho, solución buffer y albúmina de huevo.....	41
8.4.2 Evaluación de respuesta difusiva de almidones de tallo, cáscara de plátano macho y albúmina bajo variación de pH y concentración.....	43
8.4.3 Difusividades de Maxwell - Stefan en sistema de almidones de desechos postcosecha del plátano macho y proteína modelo a un pH específico.....	52
9. CONCLUSIONES.....	55
10. BIBLIOGRAFÍA.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Estructura química del almidón.....	15
Figura 2. Estructura del tallo del plátano macho.....	17
Figura 3. Evidencia de la coloración azul intensa tras la adición del reactivo de Lugol en muestras de almidón extraído de cáscara (izquierda) y tallo (derecha) de plátano macho.....	33
Figura 4. Espectros de FTIR de almidones de tallo y cáscara de plátano macho.....	36
Figura 5. Solubilidad a diferentes temperaturas de almidones extraídos de desechos postcosecha del plátano macho.....	38
Figura 6. Poder de Hinchamiento (PH) a diferentes temperaturas de almidones extraídos de tallo y cáscara de plátano macho.....	39
Figura 7. Capacidad de absorción (CABS) del agua a diferentes temperaturas del almidón del tallo y cáscara de plátano macho.....	40
Figura 8. Potencial Zeta (ζ) de almidón de tallo del plátano macho y buffer fosfato.....	42
Figura 9. Potencial Zeta (ζ) de almidón de cáscara del plátano macho y buffer fosfato.....	42
Figura 10. Potencial Zeta (ζ) de proteína Albúmina de clara de huevo y buffer fosfato.....	43
Figura 11. Modelo de Phillies para interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato.....	44
Figura 12. Modelo de Phillies para interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato.....	46
Figura 13. Modelo de Phillies para interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato.....	47
Figura 14. Modelo de Zimm para interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato.....	49
Figura 15. Modelo de Zimm para interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato.....	50
Figura 16. Modelo de Zimm para interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato.....	51

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Parámetros ópticos para cada muestra introducida en el equipo DLS.....	31
Tabla 2. Rendimiento de extracción de almidón de tallo y cáscara de plátano macho.....	32
Tabla 3. Resultados índice de blancura de almidones extraídos de desechos del plátano macho...	34
Tabla 4. Tamaño de partícula promedio de almidones extraídos de desechos de plátano macho....	35
Tabla 5. Temperatura de gelatinización de almidones extraídos de desechos de plátano macho....	41
Tabla 6. Resultados de Phillies lineal de interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato.....	45
Tabla 7. Resultados de Phillies lineal de interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato.....	46
Tabla 8. Resultados de Phillies lineal de interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato.....	47
Tabla 9. Resultados de modelo Zimm de interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato.....	49
Tabla 10. Resultados de modelo Zimm de interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato..	50
Tabla 11. Resultados de modelo Zimm de interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato...	51
Tabla 12. Difusividades binarias ajustadas según pH 9.....	53
Tabla 13. Difusividades binarias entre solutos (Maxwell Stefan) a pH 9.....	54

1. INTRODUCCIÓN

El almidón es uno de los polímeros más utilizados en alimentos, bioprocesos e industria, y su relevancia es especialmente alta en países con fuerte actividad agrícola como Colombia (DataWheel, s.f), donde constituye un producto estratégico dentro del sector agroindustrial. Aunque la yuca es actualmente la principal fuente de almidón en el país, la dependencia de un solo cultivo y las limitaciones tecnológicas de la cadena productiva han impulsado la búsqueda de materias primas alternativas y sostenibles (Torres, P et al., 2010; Arnol, 2019). En este contexto, los residuos poscosecha del plátano (uno de los cultivos de mayor producción nacional), se han perfilado como fuente potencial de polisacáridos aprovechables, contribuyendo a la valorización de subproductos agrícolas en línea con los principios de economía circular (Aguiar et al., 2022; Makroo et al., 2021).

Sin embargo, más allá de su obtención, el verdadero desafío científico radica en comprender cómo las características estructurales de estos almidones no convencionales influyen en su comportamiento en sistemas coloidales, por ello, su caracterización fisicoquímica constituye un paso esencial para evaluar su viabilidad en aplicaciones biotecnológicas, alimentarias y farmacológicas. Por otra parte, en sistemas donde el almidón interactúa con otras macromoléculas, como las proteínas, fenómenos como la agregación, la estabilidad y la movilidad molecular están fuertemente gobernados por los procesos de difusión, los cuales resultan fundamentales para describir el transporte de masa y las interacciones hidrodinámicas de biopolímeros en solución (Tadros, 2013).

La dinámica difusiva de los almidones extraídos de desechos del plátano puede verse significativamente influenciada por la presencia de fibras, lignina y otros componentes residuales propios de matrices vegetales complejas, los cuales afectan la movilidad y el comportamiento coloidal del sistema. Las interacciones entre almidón y las proteínas adquieren relevancia, ya que el comportamiento hidrodinámico de estas últimas depende fuertemente del pH y del entorno coloidal en el que se encuentran. Por ello, para el estudio controlado de dichas interacciones es habitual emplear proteínas modelo, como la albúmina de clara de huevo, ampliamente documentada debido a su estabilidad, estructura definida, propiedades coloidales reproducibles y fácil disponibilidad en el mercado científico (Peters, 1995).

A pesar del creciente interés en la valorización de residuos agroindustriales, existe una evidente ausencia de estudios que analicen la difusión entre almidones provenientes de matrices no convencionales y proteínas, y que además integren modelos hidrodinámicos como Zimm, Phillies o relaciones de conversión Fick-Maxwell-Stefan en el límite diluido para estimar parámetros difusivos. La aplicación de estos modelos a biopolímeros extraídos de residuos agrícolas representan una oportunidad para comprender su comportamiento molecular y evaluar su potencial funcional en sistemas multicomponentes.

El presente trabajo estudia la difusión entre almidones obtenidos de residuos poscosecha del plátano (cáscara y tallo) y una proteína modelo (albúmina de huevo), analizando cómo el pH, concentración y las características intrínsecas del material influyen en su comportamiento hidrodinámico. A partir de ello, se busca establecer parámetros difusivos que permitan describir las interacciones macromoleculares y, al mismo tiempo, aportar bases científicas para la valorización de residuos agroindustriales mediante la producción de biopolímeros funcionales.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agroindustria del almidón en Colombia tiene gran relevancia, pero su dependencia de cultivos convencionales y métodos tradicionales limita su diversificación y sostenibilidad. Esto restringe la posibilidad de innovar, aprovechar residuos agrícolas y reducir la vulnerabilidad frente a variaciones climáticas, de mercado o de disponibilidad de materia prima.

Los residuos del cultivo de plátano (cáscara, pseudotallo/tallo, hojas y otras partes de la planta) constituyen una fuente abundante de biomasa con alto contenido de polisacáridos, fibra, pectinas, celulosa, e incluso almidón, lo que los hace atractivos como materias primas no convencionales (Gómez et al., 2020). Investigaciones recientes sobre valorización de residuos de plátano sugieren que estos pueden transformarse en biopolímeros, bioplásticos, materiales biodegradables o biofilms, demostrando su capacidad técnica para aplicaciones industriales y de economía circular (Kumari et al., 2025).

Aunque existe interés en ese tipo de valorización, faltan estudios que analicen de forma detallada las propiedades fisicoquímicas, la estabilidad coloidal y la dinámica de transporte (difusión) de los biopolímeros extraídos de residuos de plátano, especialmente en mezclas con otros componentes como proteínas. Esta carencia es significativa, pues la funcionalidad real de estos biopolímeros (materiales, ingredientes, formulaciones o componentes complejos) depende no solo de su composición química, sino de su comportamiento hidrodinámico, su capacidad para mantenerse en suspensión, su estabilidad frente a variaciones de pH o concentración y su interacción con otras moléculas.

La interacción de almidones de residuos vegetales con proteínas, puede modificar las propiedades físicas, la movilidad molecular, la agregación, la formación de estructuras supramoleculares y la funcionalidad final. Pero las investigaciones actuales sobre residuos del plátano se han enfocado principalmente en aspectos de extracción, composición química general o en aplicaciones como biocombustibles o bioplásticos, sin explorar en profundidad la dinámica coloidal o la difusión en sistemas almidón-proteína (Gómez et al., 2020).

Existe una brecha de conocimiento relevante en torno en la forma en que varían los parámetros difusivos, la estabilidad coloidal, los fenómenos de agregación y las interacciones macromoleculares cuando se emplean almidones provenientes de residuos del plátano en mezcla con proteínas, bajo distintas condiciones de pH y concentración. Asimismo, se desconocen las

implicaciones de estos comportamientos para su potencial aplicación técnica, por lo que se hace necesario desarrollar un estudio que evalúe sistemáticamente estas variables, con el fin de generar información sólida sobre las interacciones presentes en dichos sistemas.

El problema abordado en esta tesis trasciende la simple verificación de la presencia de almidón en residuos agrícolas y se centra en la caracterización integral de su comportamiento funcional cuando se integra con otros componentes del sistema. El trabajo establece bajo qué condiciones estos almidones presentan propiedades funcionales consistentes y reproducibles, así como los rangos operativos en los que dichas propiedades se mantienen estables. Estos resultados científicos contribuyen en el aprovechamiento como fuente alternativa de biopolímeros en Colombia, fortalece el desarrollo de esquemas sostenibles de transformación y uso de subproductos agroindustriales.

3. JUSTIFICACIÓN

La comprensión del comportamiento fisicoquímico de sistemas biopoliméricos multicomponentes es un desafío vigente en la ciencia de materiales blandos, en la ingeniería de alimentos y bioprocesos. En particular, las mezclas almidón- proteína exhiben fenómenos complejos de interacción, agregación, exclusión volumétrica y cambios hidrodinámicos que determinan su estabilidad, funcionalidad y desempeño en matrices industriales. Estos mecanismos dependen fuertemente del pH, la concentración y la conformación molecular, además, su análisis requiere estudios específicos basados en transporte y dinámica de coloides (Tadros, 2013).

Evaluar almidones provenientes de fuentes alternativas como los residuos agroindustriales del plátano no solo aporta desde la sostenibilidad, sino que también implica el estudio de sistemas coloidales y macromoleculares con características diferentes a los almidones comerciales. La literatura reporta que los almidones de origen no convencional pueden presentar variaciones en cristalinidad, composición, tamaño de partícula y distribución granular (Moorthy, 2002), lo que modifica significativamente sus propiedades hidrodinámicas y su modo de interacción con proteínas. Esta variabilidad plantea interrogantes científicos relevantes sobre el comportamiento de estos polisacáridos en presencia de proteínas modelo, debido a su estructura globular bien definida, alta solubilidad en un amplio rango de pH y estabilidad coloidal (Gentile, 2020). Estas características la convierten en un referente adecuado para analizar de forma controlada las interacciones bio poliméricas y aislar los efectos atribuibles al almidón dentro del sistema .

Existe una brecha en la literatura respecto a la caracterización difusiva y coloidal de almidones derivados de residuos, ya que la mayoría de trabajos se enfocan únicamente en su composición o funcionalidad tecnológica, dejando de lado su dinámica molecular en presencia de otras biomoléculas. Comprender cómo estas interacciones modifican el radio hidrodinámico, el potencial zeta, la formación de agregados o la movilidad transnacional es fundamental para predecir la estabilidad de los sistemas y su aplicabilidad en procesos industriales donde coexisten

proteínas y polisacáridos, como encapsulación, formulación farmacéutica, gelificación o separación de biomoléculas (Dickinson. 2002; McClements, 2016).

La dispersión de luz dinámica (DLS) constituye una herramienta esencial para estudiar la difusión traslacional, identificar poblaciones coloidales y evaluar los cambios inducidos por el pH o la concentración en mezclas almidón-proteína. La aplicación de modelos hidrodinámicos como Zimm y Phillies permite interpretar los mecanismos de transporte en medios donde existe interacción macromolecular y agregación, aportando un marco cuantitativo robusto para el análisis de sistemas complejos (Rubinstein & Colby, 2003).

El presente estudio aborda la caracterización del comportamiento de almidones obtenidos a partir de residuos de plátano dentro de sistemas macromoleculares complejos, desde una perspectiva difusiva y coloidal. Se analiza su interacción con proteínas modelo, evaluando cómo variables fisicoquímicas como el pH y la concentración influyen en la movilidad molecular, la estabilidad coloidal y los fenómenos de agregación. A partir de este enfoque, el trabajo aporta información fundamental sobre el comportamiento hidrodinámico de almidones no convencionales, usualmente ausente en la literatura. Estos resultados constituyen una base científica sólida para la comprensión y el diseño de aplicaciones basadas en biopolímeros, tales como formulaciones, procesos de separación y otros sistemas donde coexisten polisacáridos y proteínas.

El trabajo analiza de manera directa cómo los almidones obtenidos a partir de residuos de plátano influyen en las interacciones con proteínas y en los procesos de transporte de masa dentro de sistemas macromoleculares multicomponentes. A través de la caracterización de parámetros difusivos e hidrodinámicos, se establece la relación entre la estructura del almidón, las condiciones fisicoquímicas del medio y la dinámica molecular del sistema. El trabajo aporta bases científicas para la comprensión de los fenómenos de transporte en mezclas bio poliméricas y sustenta la valorización técnica de residuos agroindustriales como materia prima funcional.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar las tasas de difusión en sistemas formados por almidones extraídos del tallo y la cáscara de plátano macho y una proteína modelo (albúmina de clara de huevo), mediante técnicas físico-químicas.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físicas, químicas y tecno funcionales de almidones extraídos por sedimentación de tallo y cáscara de plátano macho.
- Estimar el efecto de la concentración y el pH en las difusividades binarias en los almidones y albúmina de huevo.
- Establecer tasas de difusión presentes en el sistema Almidón-Agua-Proteína con correlaciones semi empíricas.

5. MARCO CONCEPTUAL

5.1 Almidón

El almidón es un polisacárido de origen natural que está presente en diversas plantas, donde se almacena en forma de amiloplastos de semillas, legumbres y tubérculos. Actúa como reserva energética en forma de dos tipos de moléculas; amilosa y amilopectina. Esta última forma cadenas longitudinales de 30 a 44 moléculas de glucosa con moléculas de agua intercalada, un patrón muy común en almidones de papa y plátano (Cuevas et al., 2024). Esta sustancia, al ser procesada es formulada como blanca, inodora e insípida, con capacidad de formar geles, lo cual lo convierte en un espesante ideal para diversas aplicaciones (Connor, 2023).

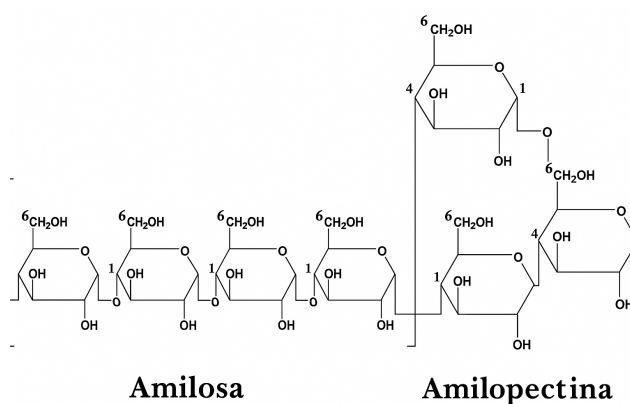


Figura 1. Estructura química del almidón

Fuente: Elaboración propia

En su forma nativa vegetal, el almidón se presenta en forma de gránulos discretos, cuya morfología, tamaño y estructura interna (zonas cristalinas y amorfas) dependen de la fuente botánica. Por ejemplo, Martínez et al. (2019) señalan que, para el almidón de papa, la caracterización fisicoquímica y estructural evidenció diferencias entre el almidón nativo y sus derivados acetilados, lo cual resalta el impacto de la modificación sobre la estructura granular y, por ende, sobre sus propiedades funcionales.

La proporción entre amilosa y amilopectina, así como la conformación de los gránulos de almidón (cristalinidad, longitud de cadenas, ramificación, tamaño de partícula) determinan propiedades claves tales como la gelatinización, hinchamiento, solubilidad, retrogradación, capacidad de absorción en agua, entre otras. Por ejemplo, los trabajos revisados indican que una mayor proporción de amilosa suele asociarse a una gelificación más fuerte y una menor solubilidad, mientras que alto contenido de amilopectina favorece la hinchabilidad y solubilidad de los gránulos (Puri, 2025; de Oliveira et al., 2020).

La estructura molecular del almidón, definida principalmente por la proporción de amilosa-amilopectina y por la arquitectura granular, determina de manera directa su

comportamiento fisicoquímico y funcional, aspectos cruciales para su aprovechamiento tecnológico. Comprender estas características no solo permite explicar su variabilidad entre distintas fuentes botánicas, sino también anticipar su aplicación en procesos de transformación industrial. Resulta pertinente contextualizar la relevancia de estas propiedades en el escenario colombiano, donde la amplia disponibilidad de materias primas ricas en almidón, junto con la creciente demanda de este biopolímero, posicionan su aprovechamiento como un eje estratégico para el desarrollo del sector agroindustrial. La siguiente sección aborda el estado y la importancia de la industria del almidón en Colombia, como punto de partida para entender la pertinencia de estudiar nuevas fuentes y caracterizarlas en detalle.

5.2 Industria de almidón en Colombia

La industria del almidón en Colombia se ha desarrollado principalmente a partir de la yuca, reconocida como la mayor fuente de este polisacárido en el país. El departamento del Cauca concentra una parte significativa de esta producción, donde operan alrededor de 210 rallanderías tradicionales dedicadas a la obtención de almidón agrio y almidón dulce, con registros históricos de aproximadamente 10.727 toneladas anuales hacia 1995 (CIAT, 1995; Torres et al., s.f.). Aunque estos sistemas artesanales han sostenido la economía rural por décadas, el sector permaneció tecnológicamente rezagado hasta finales de la década de 2000.

Un punto de inflexión ocurrió en 2009, con la creación de la empresa Almidones de Sucre, impulsada por una alianza entre el Estado y el sector privado con el propósito de valorizar la producción de yuca del Caribe colombiano (MinAgricultura, s.f.). Su incorporación de procesos de molienda húmeda a escala industrial permitió aumentar la eficiencia productiva y consolidar un mercado más competitivo. Para 2021, la empresa reportaba procesamientos cercanos a 45.000 toneladas de yuca, posicionándose como una de las plantas de mayor capacidad instalada en el país (Pérez, s.f.).

El almidón producido en Colombia abastece diversos sectores. En la industria alimentaria, cerca del 61% del almidón se utiliza como ingrediente funcional en productos como panificados, pastas, arroz preparado, tortillas y procesados de papa (Agama-Acevedo et al., 2018). Su capacidad para formar geles, proporcionar textura y actuar como espesante lo convierte en un insumo indispensable. Se emplea como estabilizante en helados, formulaciones cárnicas y conservas (Gil-Campos et al., 2015). En el sector farmacéutico cumple funciones críticas como lubricante, aglutinante, diluyente y agente desintegrante en cápsulas y tabletas, lo que lo convierte en un excipiente clave (SeoSimple, 2024). Asimismo, en la industria cosmética se utiliza como emulsificante y estabilizante en formulaciones de base oleosa, especialmente cuando el almidón ha sido previamente modificado para mejorar su compatibilidad con otros ingredientes (Álvarez et al., 2018).

El panorama de la industria del almidón en Colombia evidencia tanto su importancia económica como su dependencia casi exclusiva de fuentes tradicionales, principalmente la yuca. Esta concentración en pocas materias primas limita la diversificación del sector y abre la necesidad de

explorar biopolímeros provenientes de otros cultivos estratégicos del país. Los residuos agroindustriales del plátano surgen como una alternativa prometedora, no solo por su disponibilidad y subutilización, sino también por su alto contenido de almidón y otros componentes de interés. La siguiente sección aborda el potencial de estos residuos como fuentes complementarias para la producción de almidón y su relevancia en el contexto de la economía circular y el aprovechamiento sostenible de subproductos agrícolas.

5.3 Residuos agroindustriales de plátano en Colombia

El manejo inadecuado de los desechos agroindustriales constituye un factor que afecta directamente el equilibrio ambiental, especialmente en regiones con intensa actividad agrícola (Aguilar et al., 2022). En Colombia, esta situación se ha mantenido a lo largo de décadas, dando lugar a la generación de grandes volúmenes de residuos provenientes de diversos cultivos agrícolas. En 2017, el país produjo aproximadamente 218.007.204 toneladas anuales de residuos agrícolas, entre los cuales el plátano representó cerca de 26.547.871 toneladas, ubicándose como uno de los mayores aportantes a esta fracción residual (Gómez-Soto et al., 2019). Durante su cosecha, sólo entre el 20% y el 30% de la planta es efectivamente aprovechado; el resto, incluyendo pseudotallos, raquis y alrededor del 10% de los frutos rechazados por criterios de calidad, se convierte en desecho (Blanco et al., 2013). Esta situación se ve reforzada por el carácter monocárpico del plátano, el cual, a pesar de requerir cerca de 18 meses desde la siembra hasta la producción del fruto, genera una elevada cantidad de biomasa vegetal residual tras cada ciclo productivo, principalmente asociada al pseudotallo y las hojas. Estos ciclos relativamente prolongados, junto con la magnitud de la biomasa descartada, favorecen la acumulación de residuos agroindustriales (Norton et al., 2017).

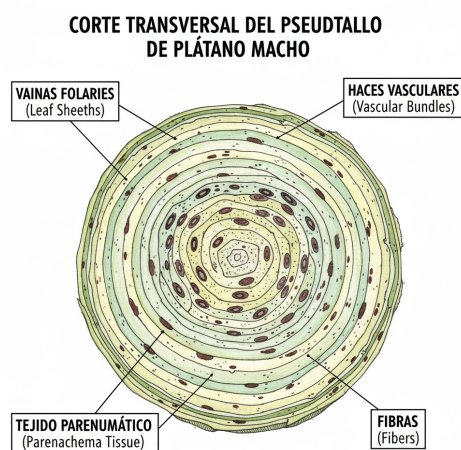


Figura 2. Estructura del tallo del plátano macho

Fuente: Elaboración propia asistida por Inteligencia Artificial GEMINI

Estos residuos se clasifican como biomasa residual procedente tanto de actividades agrícolas como de desechos urbanos (Chen, 2014). Su composición incluye celulosa, hemicelulosa, lignina y fracciones variables de almidón, lo que los convierte en materiales con potencial de valorización mediante procesos físicos, químicos o biotecnológicos. Diversos estudios han demostrado que estos subproductos pueden emplearse en la producción de biocombustibles, generación de energía y síntesis de biopolímeros (Julio et al., 2017). En particular, las cáscaras de plátano han mostrado contenidos apreciables de proteínas (~5%), además de una estructura lignocelulósica susceptible de pretratamientos orientados a la obtención de carbohidratos fermentables y polímeros naturales (Espinoza-Guerra et al., 2019).

Los residuos agroindustriales del plátano presentan una biomasa abundante, subutilizada y con un perfil composicional que incluye carbohidratos estructurales, proteínas y fracciones de almidón, lo que abre la posibilidad de transformarlos en productos de valor agregado. A partir de esta disponibilidad y diversidad composicional surge la necesidad de caracterizar de manera rigurosa los componentes presentes, especialmente el almidón, cuyo comportamiento funcional y sus interacciones con otros componentes son determinantes para su aprovechamiento tecnológico.

5.4 Caracterización de almidón y residuos del plátano

La caracterización del almidón es un proceso fundamental para comprender su comportamiento estructural, funcionalidad y tecnológico, especialmente cuando proviene de fuentes no convencionales como los residuos del plátano.

Dentro de la caracterización fisicoquímica del almidón, parámetros como el índice de blancura, el pH y el contenido de humedad constituyen indicadores clave para evaluar su grado de pureza, estabilidad e idoneidad para su uso en aplicaciones industriales. El índice de blancura se relaciona con el grado de refinamiento y la presencia de impurezas o componentes asociados; un valor alto es deseable para procesos donde la estética y la uniformidad del producto son críticas. Por su parte, el pH permite identificar la presencia de compuestos ácidos o derivados del procesamiento, y la humedad influye directamente en la estabilidad microbiológica, la fluidez del polvo y la capacidad de almacenamiento del almidón.

La granulometría describe la distribución del tamaño de los gránulos y puede realizarse mediante técnicas como la sedimentación o la difracción láser, que permiten obtener parámetros como el diámetro medio o percentiles volumétricos. Como señalan Agama-Acevedo et al. (2015), estas distribuciones ayudan a predecir el comportamiento del almidón durante procesos térmicos o mecánicos, ya que gránulos de distinto tamaño exhiben diferentes patrones de hinchamiento, solubilización y ruptura.

A nivel termofísico, la gelatinización trata del proceso en el cual los gránulos absorben agua, se hinchan y pierden su estructura cristalina cuando son sometidos a calor. Este evento puede evaluarse mediante perfiles de viscosidad o calorimetría diferencial, que permiten identificar la temperatura de inicio, pico y final del proceso. De acuerdo con Rivas-González et al. (2008), la

gelatinización define la capacidad del almidón para formar geles, espesar o modificar la textura en matrices alimentarias y farmacéuticas, por lo que es un parámetro frecuentemente reportado en estudios comparativos entre fuentes botánicas.

A nivel molecular, técnicas espectroscópicas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permiten identificar los grupos funcionales presentes en el almidón, la organización de sus regiones cristalinas y posibles interacciones con otros componentes de la biomasa. Esta herramienta resulta particularmente útil cuando se trabaja con residuos agroindustriales, donde pueden existir proteínas, fibras o compuestos fenólicos asociados a la matriz. La caracterización de residuos del plátano suele incluir la identificación de componentes bioactivos como antioxidantes naturales (vitaminas, carotenoides y compuestos fenólicos) presentes en estructuras como la cáscara, cuya relevancia ha sido destacada por estudios orientados a la producción de alimentos funcionales (Espinoza-Guerra et al., 2019).

En el caso de matrices complejas como los residuos agroindustriales del plátano, la caracterización también comprende la identificación y distribución de proteínas presentes en estructuras vegetales. Técnicas como la electroforesis SDS-PAGE permiten estimar rangos de pesos moleculares y clasificar proteínas según su función biológica, tal como ha sido reportado para extractos proteicos de la flor del plátano (Sitthiya et al., 2018). Este tipo de información es esencial cuando se pretende estudiar fenómenos de interacción o difusión entre macromoléculas, como ocurre en sistemas almidón-proteína.

En conjunto, la caracterización fisicoquímica, térmica y molecular del almidón de los residuos del plátano proporciona un marco conceptual que permite comprender cómo sus componentes interactúan y se comportan en sistemas complejos. Estos elementos no solo determinan su funcionalidad industrial, sino que también condicionan los fenómenos de transporte y difusión que se presentan cuando coexisten con otras macromoléculas.

5.5 Proteínas en solución

Las proteínas en solución acuosa se comportan como macromoléculas globulares que están rodeadas por una capa de moléculas de agua, lo que permite su dispersión en el medio y evita agregación. Este estado depende de su conformación, de interacciones proteína-agua, y de las condiciones del medio (pH, fuerza iónica, concentración, temperatura) (Tchiakam et al., 2025).

La solubilidad de las proteínas es un equilibrio dinámico entre interacciones atractivas (como puentes hidrofóbicos, enlaces de hidrógeno, interacciones Van Der Waals) y repulsivas (electrostáticas, solvatación). Cualquier cambio en las condiciones del medio puede alterar este equilibrio, modificando la tendencia a agregarse, precipitar o mantenerse en solución (Rajan et al., 2021).

Una proteína en solución corresponde a una macromolécula cuya conformación, carga superficial y grado de hidratación determinan su estabilidad, movilidad y capacidad de interacción con otros

biopolímeros. Estas propiedades controlan su difusión y su comportamiento cuando coexiste con polisacáridos como el almidón. En este contexto, resulta fundamental comprender el comportamiento general de las proteínas en solución para seleccionar una proteína modelo adecuada y anticipar su interacción con el almidón. Bajo estos criterios, la albúmina se introduce en la sección siguiente como sistema modelo para el análisis de mezclas proteína–polisacárido.

5.6 Albúmina (Proteína modelo)

La albúmina sérica, o proteínas similares como albúmina de huevo, son ampliamente usadas como modelo en biología, bioquímica y estudios de transporte porque presentan varias ventajas: estructura globular estable, buen grado de solubilidad, fácil disponibilidad, peso molecular conocido y un comportamiento predecible en solución. Estas características facilitan su uso en ensayos de difusión, interacción con polisacáridos o estudios coloidales (Carter & Ho, 1994).

Debido a su conformación compacta y a la exposición de grupos polares cargados en su superficie, la albúmina suele mantener una capa de solvatación eficiente, lo que favorece su estabilidad en solución siempre que las condiciones de pH, fuerza iónica y concentración estén adecuadas (Tchiakam et al., 2025).

El uso de albúmina como proteína modelo en mezclas con polisacáridos permite obtener datos reproducibles sobre solubilidad, estabilidad coloidal y difusión, en este estudio la albúmina se presenta como biocomponente ideal para evaluar las interacciones y dinámicas macromoleculares con almidón.

El medio en el que se encuentran las macromoléculas condiciona su solubilidad y estabilidad, por lo que variables como el pH resultan relevantes para su comportamiento en solución. En este contexto, la siguiente sección aborda el efecto del pH sobre el comportamiento de macromoléculas en solución.

5.7 pH y comportamiento de macromoléculas

El pH del medio afecta la carga neta de las proteínas y otros biopolímeros mediante la ionización o protonación de grupos funcionales ácidos y básicos. Cuando una proteína se aproxima a su punto isoeléctrico (pI), su carga neta tiende a cero, lo que reduce las repulsiones electrostáticas entre moléculas y favorece la agregación, precipitación o asociación (Zapata & Marapara. 2020).

Si el pH está alejado del pI, la carga neta aumenta positiva o negativamente, lo que incrementa las fuerzas de repulsión entre moléculas similares y favorece la estabilidad en solución. En polímeros como los polisacáridos y los almidones, aun en ausencia de cargas formales definidas, el pH puede afectar de manera significativa la solvatación, la conformación macromolecular, la organización de la red y las interacciones con especies cargadas o polares. Estas variaciones se reflejan en

cambios en la solubilidad, la propensión a la agregación y la compatibilidad con otras macromoléculas dentro del sistema. (Morales et al., 2021).

En mezclas proteína–polisacárido, el pH condiciona el comportamiento del sistema al favorecer la formación de complejos, coacervados o agregados, o bien mantener la dispersión, según las cargas relativas y la estructura molecular. Dado que estos efectos se manifiestan directamente en la solubilidad y en la estabilidad coloidal de las macromoléculas, resulta necesario abordar a continuación los criterios que gobiernan dichos fenómenos en solución.

5.8 Solubilidad y estabilidad coloidal de macromoléculas

La solubilidad de una macromolécula en agua depende del balance entre interacciones favorables soluto-solvente y las interacciones desfavorables del tipo atractivas soluto-soluto. Si la solvatación es lo suficientemente fuerte y las fuerzas repulsivas predominan, la molécula permanece dispersa, de lo contrario, puede precipitar o agregarse (Zapata & Marapara. 2020).

Cuando se trata de sistemas coloidales como partículas o macromoléculas dispersas en un medio líquido, la estabilidad coloidal implica que dichas partículas no sedimentan, agregan, ni floculen, por un periodo razonable bajo condiciones dadas. La estabilidad del sistema está determinada por factores como la carga superficial, la solvatación, la fuerza iónica, la concentración, el pH y la presencia de otros solutos. En mezclas de biopolímeros, la coexistencia de distintas macromoléculas introduce un nivel adicional de complejidad, ya que las interacciones proteína–proteína, polisacárido–polisacárido y proteína–polisacárido pueden promover o comprometer la estabilidad coloidal del sistema.

En suspensiones de almidón y proteínas se forman sistemas coloidales, donde la carga superficial de las partículas medida como potencial Zeta determina la estabilidad frente a la agregación. Valores absolutos altos de potencial ($\zeta > 30 \text{ mV}$) generan repulsión electrostática, favoreciendo la dispersión y la difusión independiente de las partículas. Valores cercanos a cero, promueve la circulación y disminuyen la movilidad difusiva (Grimnes & Martinsen, 2014).

La solubilidad y la estabilidad coloidal de macromoléculas dependen de las propiedades individuales de cada componente y de las condiciones del medio, y constituyen la base para la formación de mezclas bio poliméricas estables (Burken & Sommer, 2024). El análisis de los factores que regulan estos fenómenos permite avanzar desde el comportamiento individual de las macromoléculas hacia el estudio de las interacciones proteína–polisacárido que se manifiestan en sistemas complejo

5.9 Interacciones proteína-polisacárido

Las mezclas de proteínas y polisacáridos constituyen sistemas multifase con un amplio rango de interacciones: electrostáticas, mediante puentes de hidrógeno, mediante exclusión volumétrica,

interacciones hidrofóbicas o de la dispersión, dependiendo de la naturaleza de los biopolímeros y de las condiciones del medio. Estas interacciones condicionan la formación de complejos solubles, agregados, alteración de la solubilidad, la estabilidad, la viscosidad, la difusión y funcionalidad final del sistema (Doublier et al., 2000)

En sistemas alimentarios, farmacéuticos o de materiales estas interacciones se aprovechan para diseñar ingredientes con funcionalidad específica como gelificación, encapsulación, emulsión, liberación controlada, ya que la mezcla proteína-polisacárido puede mejorar la estabilidad, la textura y la protección de compuestos bioactivos (Dickinson, 2008). Por ello, al estudiar almidones extraídos de fuentes no convencionales y su mezcla con proteínas modelo, es indispensable considerar cómo estos mecanismos de interacción modulan la estabilidad y funcionalidad del sistema, y cómo condiciones como pH, concentración o fuerza iónica pueden favorecer o inhibir dichas asociaciones.

Una vez establecidas las bases sobre solubilidad, estabilidad coloidal e interacciones proteína-polisacárido, resulta necesario analizar cómo estos factores se reflejan en la movilidad y distribución de las macromoléculas en solución. En este contexto, la sección siguiente aborda la difusión como el mecanismo que permite describir el comportamiento dinámico de estos sistemas y vincular sus propiedades hidrodinámicas con su respuesta macroscópica.

5.10 Difusión macromolecular

La difusión macromolecular es el fenómeno por el cual las moléculas o partículas se mueven aleatoriamente en un medio debido a su energía térmica, lo que permite el transporte de masa, el equilibrio de concentraciones y la reorganización de mezclas. En soluciones de macromoléculas, la difusión no depende solo del tamaño o peso molecular, sino también de su forma, su interacción con el medio, como viscosidad y solvatación, su concentración, y de las interacciones entre moléculas: proteína-proteína, proteína-polisacárido, exclusión volumétrica (Li et al., 2004).

En sistemas diluidos, la difusión puede describirse mediante modelos clásicos como Stokes-Einstein (Krishna & Wesselingh, 1997); sin embargo, en mezclas concentradas o sistemas coloidales complejos se ve afectada por *crowding*, interacciones entre macromoléculas y restricciones estructurales, lo que exige modelos más elaborados. En este sentido, comprender la difusión en mezclas biopoliméricas, particularmente almidón-proteína, constituye un paso previo necesario para abordar los fenómenos de transferencia de masa, en los cuales la movilidad molecular se manifiesta a escala macroscópica.

5.11 Fenómenos de transferencia de masa

La transferencia de masa en sistemas fluidos puede ocurrir principalmente por difusión y convección. La difusión es el movimiento de las moléculas de mayor a menor concentración, impulsados por gradientes de concentración, temperatura y presión. Este concepto fue introducido en los fenómenos de transporte por Adolf Fick, determinando las leyes de transporte por difusión

(Fick, 1855). Por su parte, la convección implica el arrastre de solutos debido al movimiento macroscópico del fluido, fenómeno frecuente en procesos de agitación o flujo forzado.

La difusión molecular se describe clásicamente mediante las leyes de Fick, cuyas leyes evalúan el flujo de masa en función del coeficiente de difusión y su gradiente en la concentración (Ec.1) ; en la misma línea la segunda ley aplica la evolución temporal de la concentración en un sistema homogéneo (Ec. 2) (López et al., 2021).

$$J_{ij} = - D_{ij} \nabla C_{ij} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_{ij} \nabla^2 C_{ij} \quad (2)$$

Las ecuaciones de Maxwell–Stefan se emplean para describir el transporte de masa en mezclas multicomponentes, en las cuales las interacciones cinéticas entre las distintas especies impiden considerar su movimiento de manera independiente (Krishna & Wesselingh, 1997). El flujo de cada componente se encuentra acoplado al de los demás a través de fuerzas de fricción o arrastre molecular, que representan la resistencia mutua al movimiento relativo entre especies (Ec. 3). A diferencia de la ley de Fick, las ecuaciones de Maxwell–Stefan incorporan explícitamente estas resistencias inter-especie, proporcionando una descripción más adecuada de los fenómenos de transporte en sistemas complejos.

$$-\nabla \mu_{ij} = \sum_{j \neq i} \frac{x_i x_j}{D_{ij}} (v_i - v_j) \quad (3)$$

Donde μ_i es el potencial químico, x_i la fracción molar y D_{ij} el coeficiente de difusión Maxwell–Stefan entre especies i y j (Kubaczka, 2014).

El análisis de los fenómenos de transporte permite describir la movilidad de las especies en sistemas complejos y relacionarla con interacciones moleculares y efectos de fricción. Resulta necesario introducir técnicas experimentales que permitan cuantificar dicha movilidad a escala nanométrica en sistemas de macromoléculas. La sección siguiente aborda la dispersión de luz dinámica y la medición del potencial zeta como herramientas para caracterizar el tamaño hidrodinámico, el estado de agregación y la estabilidad electrostática de las mezclas estudiadas.

5.12 Dispersión de Luz dinámica (DLS) y Potencial Zeta (ζ)

La dispersión de luz dinámica (DLS) es una técnica basada en el análisis de las fluctuaciones temporales de la intensidad de la luz dispersada por partículas en suspensión, ocasionadas por movimiento Browniano. Al incidir un haz láser monocromático sobre la muestra, las partículas dispersan la luz y un detector registra las variaciones de intensidad a lo largo del tiempo (Lasolastech, 2024). Esta herramienta permite determinar las distribuciones de tamaño en el rango

de nanómetros a micrómetros, identificar poblaciones múltiples y evaluar la homogeneidad de la muestra sin necesidad de separación previa. Es especialmente útil para caracterizar sistemas coloidales de biopolímeros, como mezclas de almidón y proteínas, donde el tamaño hidrodinámico y su polidispersidad influyen directamente en los fenómenos de transporte de masa (Stetefeld et al., 2016) .

El potencial zeta (ζ) cuantifica el potencial electrocinético en la interfase partícula–disolvente y refleja la carga efectiva presente en la capa de deslizamiento que rodea a las partículas. Su determinación se realiza mediante la aplicación de un campo eléctrico a la suspensión y la medición de la movilidad electroforética de las partículas, la cual se convierte en potencial zeta a través de la ecuación de Henry. Este parámetro constituye un indicador crítico de la estabilidad coloidal del sistema, ya que está directamente relacionado con las fuerzas de repulsión electrostática entre partículas (Krishna et al., 2020). En soluciones de almidón y proteínas, por separado, el potencial Zeta ayuda a predecir la tendencia a formar agregados o a mantener una dispersión estable, información esencial para interpretar cómo estas interacciones afectan las tasas de difusión.

La información obtenida mediante DLS y potencial zeta ofrece una visión integrada del comportamiento dinámico y electrostático de las partículas en suspensión, lo que permite interpretar con mayor precisión la organización, estabilidad y movilidad de sistemas coloidales basados en biopolímeros. Gracias a estas herramientas, es posible relacionar el tamaño hidrodinámico, la polidispersidad y la carga superficial con los mecanismos de difusión y las interacciones macromoleculares previamente expuestos, estableciendo un puente claro entre la teoría del transporte de masa y la caracterización experimental. De esta manera, los fundamentos presentados en esta sección proporcionan el soporte conceptual para analizar los resultados experimentales, donde la evolución del tamaño de partícula y el estado coloidal desempeñan un papel determinante en el comportamiento del almidón y las proteínas bajo distintas condiciones físico químicas.

6. ANTECEDENTES

El aprovechamiento de residuos agroindustriales del plátano, como la cáscara, pseudotallo y raquis, ha sido estudiado principalmente desde la perspectiva de su composición y potencial. Diversos autores han reportado que estos subproductos contienen proporciones relevantes de almidón, celulosa y hemicelulosa, lo que los convierte en una materia prima prometedora para la obtención de biopolímeros bajo esquemas de economía circular (Kumar et al., 2023).

En particular, Hernández, et al. (2017) demostraron que la cáscara de plátano puede alcanzar hasta un 29% de almidón en base seca, destacando su potencial en aplicaciones industriales donde requieren insumos de bajo costo y accesibles.

Estudios como los de Olivera et al. (2007) y Cordeiro et al (2004) caracterizaron la composición de diferentes fracciones de la planta, mostrando que el pseudotallo y el raquis también presentan cantidades apreciables de carbohidratos estructurales susceptibles de ser transformados.

La valorización de residuos de plátano ha sido abordada también en contexto de su uso para formulaciones alimentarias, compuestos bioactivos y obtención de fibras y polisacáridos funcionales. Investigaciones como las de Sitthiya et al., (2018) y Ramu, R. et al (2017) han demostrado que otras fracciones de cultivo (como flores y pseudotallos) contienen proteínas y metabolitos con potencial tecnológico y nutricional.

La literatura científica sobre la movilidad de macromoléculas como proteínas y polisacáridos se ha centrado principalmente en sistemas modelo, donde se estudia la difusión traslacional usando enfoques de hidrodinámica clásica y dinámica de coloides. Trabajos recientes, como Phillies (2016), describen cómo la difusión depende de factores como la concentración, la viscosidad y las interacciones intermoleculares.

Asimismo, los modelos de Zimm (1956) han contribuido significativamente al entendimiento del comportamiento de polímeros flexibles en solución, incorporando efectos hidrodinámicos y la dependencia del coeficiente de difusión con la masa molecular.

En el campo de los biopolímeros alimentarios, varios estudios han evaluado la movilidad hidrodinámica de polisacáridos y proteínas bajo diferentes condiciones de pH, fuerza iónica y concentración, investigación que se ha desarrollado mayormente en sistemas idealizados como dextranos, gelatinas o proteínas globulares puras (Verónica et al., 2021).

En el uso de técnicas de Dispersión de luz dinámica (DLS) y Potencial Zeta se han consolidado como herramientas fundamentales para caracterizar el tamaño hidrodinámico y la estabilidad de sistemas coloidales. Su aplicación en biopolímeros ha sido ampliamente reportada en la literatura. Por ejemplo, Makowska et al., (2022) emplearon DLS para estudiar el radio hidrodinámico y la polidispersidad en suspensiones de almidón, demostrando que parámetros del medio como pH y fuerza iónica modifican significativamente la respuesta difusiva.

Otros trabajos como el de Malgor et al. (2019), utilizaron potencial zeta para determinar el punto isoeléctrico y la estabilidad de complejos almidón-proteína, demostrando sensibilidad de los sistemas en variaciones de pH y composición. Estudios más recientes (Suri & Rafael, 2023; Martínez et al., 2020) han aplicado estas técnicas para comparar la estabilidad coloidal entre almidones nativos y modificados. Estas investigaciones consolidan el uso de DLS y potencial zeta como métodos indispensables para comprender el comportamiento coloidal de biopolímeros.

En Colombia, la mayoría de los trabajos se han centrado en la caracterización composicional y en la evaluación de métodos de extracción de almidón, como en el estudio de González (2023), quien abordó los fenómenos de transporte en procesos de extracción de almidón de plátano en un tanque

agitado. También, existen investigaciones orientadas al uso de residuos de plátano para obtención de polímeros, empaques biodegradables y formulaciones alimentarias.

La literatura muestra avances considerables en la extracción y caracterización del almidón proveniente de residuos del plátano, así como en el estudio hidrodinámico de macromoléculas mediante modelos clásicos y técnicas como el DLS y Potencial Zeta. Aún así, ningún trabajo ha integrado estas líneas de estudio para evaluar la movilidad difusiva y las interacciones proteína-almidón en sistemas derivados de residuos agroindustriales.

Hasta donde se pudo revisar, no existen reportes que estimen coeficientes de difusión efectivos, ni difusividades de Maxwell-Stefan para estos sistemas mencionados (almidón-albúmina), lo que posiciona este estudio como una contribución original y necesaria para comprender el transporte de masa en sistemas biopoliméricos complejos.

7. METODOLOGÍA

7.1 Recolección de materia Prima

Los residuos de plátano macho (*Musa paradisiaca*, variedad *Dominico-Hartón*), tallo y cáscara fueron recolectados en una finca en Rozo Valle del Cauca, en donde se es cosechado plátano diariamente para una empresa de elaboración de comestibles. El traslado se realizó en transporte refrigerado para evitar posibles degradaciones de la biomasa.

7.2 Pretratamiento de materia prima

Se realizó un corte uniforme entre 2-3 cm para facilitar su procesamiento y además de ello, se realizó un pretratamiento diferenciado. en la cáscara se aplicaron etapas de lavado con agua potable quitando impurezas visibles y secado a 45°C por 10 minutos en el horno por convección, seguido de inmersión en ácido cítrico al 1% con el fin de prevenir el pardeamiento enzimático. Para el tallo se realizó un remojo en agua caliente para facilitar la liberación del almidón y flexibilizar las fibras.

7.3 Aislamiento de almidón de residuos poscosecha de plátano

La homogeneización, se realiza un licuado con agua destilada con los fragmentos en una relación 1:3 (g/mL) usando licuadora industrial, formando una suspensión homogénea. Una vez ejecutado dicho procedimiento, se realiza un tamizado en una malla 40 (≈ 0.42 mm) para eliminar fibras gruesas o residuos no triturados.

En cuanto a la recuperación del almidón, el filtrado obtenido se dejó reposar durante 12 horas para permitir la sedimentación natural del almidón en el fondo del recipiente. Después de ese tiempo, se eliminó cuidadosamente el sobrenadante y se procedió a lavar el sedimento con agua destilada. Este proceso de lavado se repitió tres veces con el objetivo de remover impurezas

hidrosolubles. Posteriormente, el sedimento se lavó con etanol al 50%, lo cual favorece la eliminación de pigmentos, lípidos y otros compuestos asociados. El almidón húmedo resultante se extiende en bandejas y se secó en un horno entre 40 - 45°C durante 24 horas. Finalmente, el material seco se pulverizó con un mortero y se tamizó nuevamente con una malla N° 40 (pasante N° 30) para obtener un polvo fino y uniforme. El producto obtenido se almacenó en frascos herméticos, protegidos de la humedad hasta su posterior caracterización.

7.4 Verificación de obtención de almidón con reactivo Lugol

Como medio de verificación de la presencia de almidón en los desechos de plátano macho, se preparó una solución del reactivo de Lugol (solución de yodo y yoduro de potasio), el cual reacciona específicamente con los polisacáridos tipo almidón, generando una coloración azul oscuro característica. Para esta prueba, se depositaron pequeñas porciones del material extraído tanto del tallo como de la cáscara en cajas Petri, sobre las cuales se aplicó una gota del reactivo. La aparición inmediata de una coloración azul intensa confirma la presencia de almidón (Pesek & Silaghi-Dumitrescu, 2024).

7.5 Caracterización fisicoquímica y tecno funcional de almidones de desechos postcosecha del plátano macho

7.5.1 Contenido de humedad

El análisis del contenido de humedad se realiza con una balanza termogravimétrica. En primera instancia se selecciona el modo de secado, que para almidones según la Norma Técnica Peruana NTP 209.067: 1974 (INACAL, 2018), la cual es una de las referencias regionales más empleadas en estudios latinoamericanos sobre almidones debido a la ausencia de una equivalente en Colombia para este tipo de matrices. Esta norma especifica el secado de las muestras de almidón a temperatura fija de 105°C.

En cada determinación se pesaron 5 g de almidón extraído de la cáscara de plátano (el mismo procedimiento con el almidón extraído del tallo del plátano) en una cápsula de aluminio, distribuyendo de forma homogénea. El equipo realiza el análisis por medio de un peso inicial, pérdida de masa en el tiempo, peso final y % de humedad, que se calcula automáticamente, por medio de la ecuación 4:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100 \quad (4)$$

7.5.2 Índice de blancura

El índice de blancura se determinó siguiendo la metodología (Hunter, 1994). Para ello, se midieron parámetros colorimétricos L^* (luminosidad), a^* (tendencia rojo-verde) y b^* (tendencia amarillo-azul) mediante un colorímetro Chroma Meter CR-400. Con estos valores se calculó el índice de blancura (IB) utilizando la ecuación 5, ampliamente empleada para evaluar la pureza visual y el grado de refinamiento en almidones:

$$IB = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (5)$$

7.5.3 Espectroscopía Infraroja por transformada de Fourier (FTIR)

La obtención de grupos funcionales asociados se determinó por medio de un FTIR-Jasco 4100 (Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier). Previo al análisis con el equipo, se obtuvieron pellets de 200 mg de KBr y 20 mg de almidón de cáscara y del tallo, homogeneizado en el mortero de ágata. Posteriormente se prensa manualmente y se evidencia un espectro de grupos funcionales, en el rango medio infrarrojo de $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$.

7.5.4 Determinación de pH

Para la determinación del pH se calibró previamente el pH-metro (GRO LINE) utilizando soluciones tampón comerciales de pH 4 correspondiente a ácido de potasio ($KHC_8H_4O_4$), mientras que la solución pH 7 está basada en un sistema fosfato monobásico/fosfato dibásico (KH_2PO_4 / K_2HPO_4). Estas soluciones son provistas por fabricantes certificados (Mettler-Toledo International Inc., 2025).

Después de la calibración, se procedió con la preparación de las muestras. Se pesaron 5 g de cada almidón y se mezclaron con 25 mL de agua desionizada a temperatura ambiente en un vaso precipitado. La suspensión se agitó durante 5 minutos para asegurar completa dispersión del almidón y se dejó reposar brevemente para estabilizar la lectura. Finalmente el electrodo del pH-metro se sumergió en la mezcla y se registró el valor del pH directamente desde el equipo.

7.5.5 Determinación de solubilidad de almidones

En la determinación de solubilidad en agua de los almidones extraídos, se pesa 0.24 g de almidón según su procedencia en tubos de ensayo y luego se agrega 12 mL de agua desionizada. Se colocan los tubos en baño maría con agitación constante a 90°C por 30 minutos y se deja enfriar a temperatura ambiente. Se centrifugó la suspensión a 6000 rpm durante 30 minutos. Luego, se retiró cuidadosamente el sobrenadante y el sedimento obtenido se transfirió a cajas Petri. Esto se

deja secar en el horno por convección a 90°C durante 24 horas. Pasado el tiempo se pesa y se calcula con la ecuación 6:

$$\text{Solubilidad} = \frac{\text{Peso 2}}{\text{Peso 1}} * 100 \quad (6)$$

7.5.6 Determinación de Poder de Hinchamiento de almidones

Para determinar el poder de hinchamiento se pesan 0.24 g de almidón en tubos de ensayo (M_1), luego se agrega 12 mL de agua destilada y se colocan en tubos para realizar baño maría con agitación constante a 90°C por 30 minutos, luego se deja enfriar a temperatura ambiente. Se centrifuga a 6000 rpm por 30 minutos y el sobrenadante se retira, colocando en cajas petri. Se pone a secar por 24 horas Después del tiempo, se pesa el sobrenadante (M_2) y el sedimento de almidón hinchado (M_3) (Ecuación 7).

$$PH = \frac{M_3}{M_1 - M_2} \quad (7)$$

7.5.7 Determinación de capacidad de absorción en almidones

Para la capacidad de absorción de agua se utilizó el mismo procedimiento anterior, pero el cálculo empleado se registró como en la ecuación 8:

$$\text{Capacidad de Absorción de Agua} = \frac{M_2}{M_1} \quad (8)$$

7.5.8 Determinación de temperatura de gelatinización

Para la temperatura de gelatinización se pesaron 10 g de almidón y se dispersaron en 100 mL de agua destilada dentro de un vaso precipitado de 250 mL. La mezcla se calentó gradualmente en un baño maría, donde se incrementa progresivamente la temperatura.

A medida que la suspensión se calentaba, se mantuvo la agitación constante y se monitorea la temperatura continuamente con un termómetro. La temperatura de gelatinización se registró en el momento en el que la mezcla mostró signos visibles de formación de pasta (engrosamiento y pérdida de apariencia granular).

7.6 Caracterización coloidal: DLS y Potencial Zeta (ζ)

La caracterización coloidal de los almidones extraídos se llevó a cabo mediante técnicas complementarias de análisis. La Dispersión de Luz Dinámica (DLS) se empleó para determinar el

diámetro hidrodinámico y el coeficiente de difusión de las partículas, mientras que la medición del potencial zeta se utilizó para evaluar la estabilidad electrostática de las suspensiones. Ambos análisis requieren la preparación de suspensiones homogéneas y la definición adecuada de los parámetros ópticos del sistema, de modo que el software de cada equipo pueda realizar correctamente la conversión entre la señal medida, los coeficientes de difusión y el tamaño de partícula.

El diseño experimental se estructuró para analizar el efecto del tipo de muestra, almidón de tallo, almidón de cáscara y albúmina de huevo, la concentración (0.5, 0.7 y 1 % p/v) y el pH del medio (6.0, 7.5 y 9.0) sobre las propiedades fisicoquímicas y de transporte del sistema. En particular, se evaluaron las variaciones en el potencial zeta y en los parámetros difusivos obtenidos mediante Dispersión de Luz Dinámica, con el fin de establecer la influencia de estas variables sobre el comportamiento coloidal de las suspensiones.

Se empleó un diseño factorial completo (3x3x3), donde se combinaron los tres factores mencionados, dando como resultado un total de 27 tratamientos experimentales. Cada tratamiento fue realizado por triplicado, con el propósito de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los datos obtenidos, alcanzando así un total de 81 por variable de respuesta.

7.6.1 Preparación de soluciones buffer y verificación de pH

Se prepararon soluciones buffer fosfato a pH 6, 7.5 y 9, empleando fosfato monobásico de sodio (NaH_2PO_4) y fosfato dibásico de sodio (Na_2HPO_4). Las cantidades necesarias se calcularon mediante la ecuación de Henderson–Hasselbalch (Ec. 9).

$$pH = pKa + \log \frac{[A^-]}{[HA]} \quad (9)$$

Posteriormente, los 2 L de buffer preparados se verificaron con pH-metro calibrado y se ajustaron de ser necesario con $NaOH$ y HCl , como medios básicos y ácidos. Las soluciones se almacenaron refrigeradas a 4°C hasta su uso.

7.6.2 Preparación de suspensiones para análisis

Para cada pH se prepararon suspensiones independientes de: almidón de cáscara, almidón de tallo y albúmina de clara de huevo. Estas suspensiones se elaboraron en concentraciones 0.5%, 0.7% y 1% p/v en un volumen total de 50 mL. Cada mezcla se agitó durante 30 minutos en agitador magnético para minimizar sedimentación y lograr una dispersión homogénea antes de los análisis.

7.6.3 Dispersión de Luz dinámica (DLS)

La técnica empleada de DLS proporciona mediadores del coeficiente de difusión efectivos (D_{eff} - μ^2/s) de las partículas en suspensión, además del diámetro hidrodinámico (R_h) mediante ecuación de Stokes-Einstein (Ec.10).

$$D_{ij} = \frac{k_b T}{6\pi \mu R_i} \quad (10)$$

Se encendió el equipo Malvern Nano S90 y se realizó la calibración correspondiente. Cada suspensión se transfirió cuidadosamente a una cubeta de plástico de 3 mL, evitando la formación de burbujas. Luego, se ajustó en el equipo los parámetros de la Tabla 1:

- Ángulo de detección: 90°
- Tiempo de equilibrio previo: 30 segundos
- Temperatura de medición 18.5°C (Temperatura ambiental del laboratorio)
- Parámetros ópticos y reológicos utilizados:

Tabla 1. Parámetros ópticos para cada muestra introducida en el equipo DLS.

Material	Índice de refracción (η)	Absorción (k)	Fuente
Almidón	1.530	0.10	Valores típicos reportados para almidones nativos en medios acuosos (Karvinen et al., 2006 & Sindt et al., 2010)
Albúmina	1.450	0.001	Reportes de análisis de proteínas globulares (Mine, 1996)

Fuente: Elaboración propia

Para cada muestra se realizaron tres corridas, con un tiempo de medición entre 5 y 7 minutos.

En el dispersante (Buffer fosfato) el índice de refracción es 1,33, igual que el agua, ya que es una solución bastante diluida en ella. En cuanto a las viscosidades, se midieron por aparte cada muestra en el viscosímetro de Brookfield DV-I PRIME:

- Para la muestra de cáscara: $\mu = 0,80$ cP
- Para la muestra del tallo: $\mu = 0,77$ cP
- Para la albúmina: $\mu = 1,13$ cP

Finalmente, el software con aquella información reportó directamente el coeficiente de difusión (D_{ij}) ajustando la ecuación de Stokes-Einstein. Las difusividades obtenidas corresponden a difusividades efectivas (D_{eff}) y no a difusividades binarias puras (D_{ab}), debido a la naturaleza particular de los almidones. Esta distinción es fundamental para interpretar adecuadamente lo observado, puesto que los sistemas estudiados presentan una complejidad estructural significativa: los almidones son polímeros altamente polidispersos, de naturaleza multi ramificada, con

presencia de agregados y posibles estructuras gelificadas, además de contener componentes residuales como lignina, cuya proporción no pudo determinarse experimentalmente por limitaciones de equipos. Bajo estas condiciones, la movilidad hidrodinámica está fuertemente condicionada por la estructura coloidal y no únicamente por el tamaño molecular (Rodríguez-Loya et al., 2023).

7.6.4 Potencial Zeta

Se calibra el equipo Zeta Meter 4.0 y se verifica la celda de medición antes del uso. Las suspensiones se prepararon a diferentes pH (6, 7.5 y 9) y diferentes concentraciones (0.5%, 0.7% y 1% p/v), dejándose en agitación constante para evitar sedimentación de las macromoléculas. Para tener óptimas condiciones, el pH se mide entre cada muestra para verificar si se encuentra en el rango establecido por el estudio. Estas suspensiones se colocan en una cubeta de cuarzo de 30 mL y se realiza el montaje. Para cada muestra se efectuaron 15 mediciones por corrida, donde los valores obtenidos se registraron en mV y posteriormente se analizaron para evaluar tendencias de estabilidad coloidal según pH y la matriz: almidón o proteína.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Aislamiento de almidones de tallo y cáscara de plátano macho

El rendimiento corresponde a la relación entre masa de almidón seco obtenido y la masa inicial de materia prima procesada, expresada en porcentaje de peso.

Tabla 2. Rendimiento de extracción de almidón de tallo y cáscara de plátano macho

Tipo de residuo	Total procesado (g)	Almidón extraído (g)	Rendimiento (% p/p)
Cáscara	5163,7	75,25	1,46
Tallo	4816,5	37,86	0,79

Fuente: Elaboración propia

En términos comparativos, la cáscara de plátano mostró una mayor capacidad de extracción de almidón, lo que indica que esta fracción del residuo presenta composición con mayor contenido de polisacáridos disponibles, posiblemente por su estructura menos lignificada en comparación con el tallo. El tallo, por su parte, contiene una proporción más alta de fibra insoluble y lignina, lo que posiblemente limita la liberación de almidón durante las etapas de molienda, filtración y sedimentación.

Los valores de rendimiento obtenidos en la tabla 2 se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para residuos no convencionales del plátano y otros cultivos tropicales. Por ejemplo,

Khushbu et al. (2020) y Aguiar et al. (2022) reportaron rendimientos entre 0.5 y 2.0% en residuos lignocelulósicos con bajo contenido de almidón estructural, valores similares a los alcanzados en este trabajo.

8.2 Verificación de obtención de almidón de tallo y cáscara de plátano mediante reactivo Lugol

Se observó un cambio visible de color, pasando de un tono blanquecino a un azul intenso en ambas muestras de almidón extraído, lo cual confirmó la presencia efectiva de almidón tanto en la cáscara como en el tallo (Figura 3). Este resultado coincide con lo reportado por Sánchez et al. (2019), quienes describen la formación del complejo yodo-amilo como indicador confiable de la presencia estructuras $\alpha - 1,4$ y $\alpha - 1,6$ características de los polisacáridos tipo almidón.



Figura 3. Evidencia de la coloración azul intensa tras la adición del reactivo de Lugol en muestras de almidón extraído de cáscara (izquierda) y tallo (derecha) de plátano macho

Fuente: Elaboración propia

8.3 Caracterización fisicoquímica y tecnofuncional de almidón de tallo y cáscara de plátano

8.3.1 Determinación de contenido de humedad

Los resultados obtenidos evidenciaron un porcentaje promedio de humedad de 15.95% para el almidón proveniente de la cáscara, y un 19.59% para el extraído del tallo. Si bien ambos valores se encuentran dentro del rango esperado para almidones extraídos por métodos tradicionales (10-20%), la ligera diferencia entre ellos podría atribuirse a la mayor capacidad de retención de agua en el almidón proveniente del tallo (Gómez-Soto et al., 2019).

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Hernández et al. (2017), quienes observaron porcentajes de humedad entre 14 y 18% en almidones extraídos de cáscara de plátano mediante procesos de molienda y tamizado similares. La variabilidad hallada entre las muestras también puede estar asociada a diferencias en el tamaño de partícula, factores que inciden en la eliminación completa del agua libre y de la humedad ligada en la estructura granular (Suri & Rafael, 2023)

En términos generales, los valores obtenidos son indicativos de una buena estabilidad del producto, ya que contenidos de humedad superiores al 20% podrían favorecer el crecimiento microbiano y la degradación del almidón durante su almacenamiento.

8.3.2 Determinación de índice de blancura

La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos para el índice de blancura de los almidones extraídos del tallo y cáscara del plátano.

Tabla 3. Resultados índice de blancura de almidones extraídos de desechos del plátano macho

Muestra	a*	b*	L	Índice de Blancura $\pm$ DE (IB)
Almidón del tallo	3.69	13.75	74.91	71.16 $\pm$ 0.04
Almidón de la cáscara	6.45	20.62	57.75	52.54 $\pm$ 0.14

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidencian que el almidón del tallo presentó un mayor índice de blancura promedio de (71.16) en comparación con el almidón de cáscara (52.54). Esta diferencia puede explicarse por la composición estructural de cada residuo: el tallo contiene menos pigmentos naturales, como taninos, carotenoides y clorofilas, los cuales permanecen en mayor proporción en la cáscara (Kumar et al., 2023; Gómez-Soto et al., 2021).

Los valores de L^* , que representan luminosidad, fueron también superiores en el almidón del tallo (≈ 75) frente al de la cáscara (≈ 57), lo cual refleja una mayor claridad y, por tanto, mayor pureza del material extraído. En contraste, las muestras de cáscara mostraron valores b^* más elevados, evidenciando una tendencia amarillenta característica de los residuos vegetales con pigmentos residuales, que disminuye el color del IB (Chávez et al., 2017).

En comparación con estudios similares, los valores del almidón del tallo se encuentran dentro del rango típico de los almidones nativos del plátano (57-75%), mientras que los valores de almidón de cáscara se asemejan para materiales parcialmente modificados o con presencia de fibras residuales (Ortega Alvarado et al., 2016).

Aunque ambos tipos de almidón fueron correctamente aislados, el tallo presenta mejor apariencia visual y mayor pureza, siendo potencialmente más apto en aplicaciones alimentarias o cosméticas, donde la blancura es un atributo deseable. Por su parte, el almidón de la cáscara podía destinarse a usos industriales o de bioempaques donde las propiedades visuales son menos relevantes que la funcionalidad del material.

8.3.3 Tamaño de partícula

Tabla 4. Tamaño de partícula promedio de almidones extraídos de desechos de plátano macho

Tipo de muestra	Tamaño de partícula $\pm$ DE (nm)
Almidón de cáscara	2102 $\pm$ 480
Almidón de tallo	1780 $\pm$ 260

Fuente: Elaboración propia

Los valores presentados en la Tabla 4 muestran que el tamaño hidrodinámico promedio de las partículas presentes en la muestra extraída de la cáscara es mayor que el registrado para el tallo. Estas mediciones corresponden al conjunto completo de partículas presentes en cada suspensión obtenida tras el proceso de extracción, una mezcla que puede incluir almidón como componente mayoritario, acompañado de otros materiales propios del residuo vegetal. Por tanto, los diámetros reportados reflejan el comportamiento hidrodinámico de esa mezcla en dispersión y no permiten inferir composición química ni pureza del almidón.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Makowska et al. (2022), quienes enfatizan que una mayor distribución de tamaño y valores elevados del diámetro hidrodinámico en almidones indican mayor grado de agregación o menor homogeneidad en la suspensión. Además, Hassan et al. (2022) señalan que, en estudios de nano-almidón, tamaños reducidos favorecen mejores propiedades funcionales como la solubilidad y la formación de películas, lo que sugiere que el almidón del tallo podría tener mejores perspectivas de aplicación funcional.

Al analizar las tres concentraciones evaluadas, no se identificó una tendencia clara en la variación del tamaño hidrodinámico con la dilución, lo que sugiere que, dentro de este rango de concentraciones, la dilución no ejerce un efecto dominante sobre la dispersión medida. Sin embargo, la muestra correspondiente a la cáscara presentó una desviación estándar significativamente mayor ($\pm$ 480 nm), lo que indica una mayor heterogeneidad en la distribución de tamaños dentro de la suspensión.

8.3.4 Espectroscopía de transformada de Fourier (FTIR)

Ambos espectros presentaron las bandas características del almidón nativo, asociadas principalmente a las vibraciones de los enlaces $O - H$, $C - H$ y $C - O - C$ que conforman las unidades de glucopiranososa de la amilosa y la amilopectina.

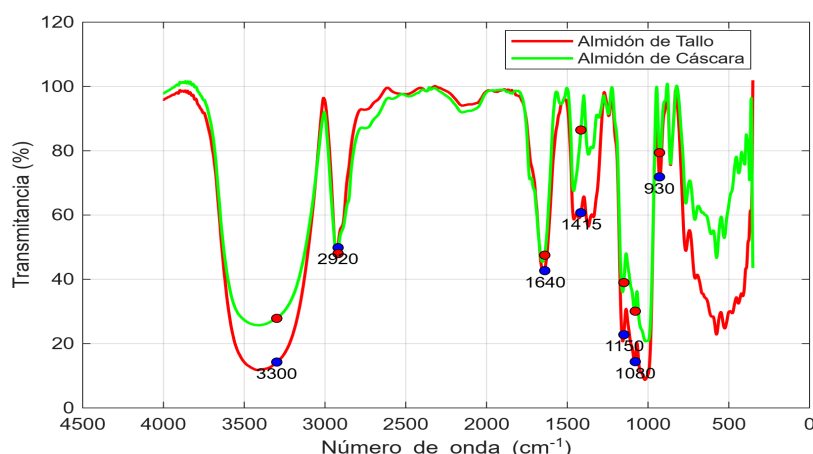


Figura 4. Espectros de FTIR de almidones de tallo y cáscara de plátano macho

Fuente: Elaboración propia

En la región $3400 - 3415 \text{ cm}^{-1}$ en la Figura 4 se observó una banda ancha atribuida al estiramiento de los enlaces $O - H$, indicando la presencia de interacciones intermoleculares por puentes de hidrógeno. Este comportamiento es típico de materiales altamente hidrofílicos como los almidones, y su intensidad sugiere la existencia de agua fuertemente ligada en la estructura. La banda en torno a 2927 cm^{-1} corresponde al estiramiento $C - H$ alifático, característico de las cadenas de glucosa (Wang et al., 2011).

Se evidenciaron señales débiles entre $1720 \text{ y } 1650 \text{ cm}^{-1}$, asociadas a grupos carbonilo ($C = O$) o a la vibración del agua absorbida en la matriz del almidón. Dichas bandas fueron más notorias en la muestra de cáscara, lo que podría deberse a una leve oxidación superficial o a la presencia de restos de compuestos no amiláceos, como lignina o proteínas (Kizil et al., 2002). En la zona comprendida entre $1450 \text{ y } 1360 \text{ cm}^{-1}$, se apreciaron deformaciones $C - H$ y $C - O - H$ correspondientes a los anillos de glucosa.

La región comprendida entre $1200 \text{ y } 900 \text{ cm}^{-1}$, conocida como la “huella digital” del almidón, mostró las bandas más intensas del espectro, debidas a las vibraciones $C - O$, $C - C$ y $C - O - H$ de las unidades de anhidroglucosa. En particular, el pico cercano a 1010 cm^{-1} confirma la presencia de enlaces glicosídicos $\alpha - 1,4$ y $\alpha - 1,6$, característicos de la estructura de amilosa y amilopectina (Zhou et al., 2021). Las bandas entre $860 \text{ y } 760 \text{ cm}^{-1}$ se atribuyen a las vibraciones típicas de los anillos de glucosa en los polisacáridos naturales.

Al comparar ambos espectros, se observa que el almidón del tallo presentó señales más definidas y limpias en la región $1200 \text{ y } 900 \text{ cm}^{-1}$, lo que sugiere una estructura más ordenada y con mayor pureza, mientras que el almidón de cáscara mostró una leve banda adicional alrededor de 1729 cm^{-1} , posiblemente relacionada con grupos carbonílicos o amidas residuales de proteínas o

compuestos fenólicos presentes en la cáscara. Estas diferencias concuerdan con los resultados de índice de blancura y tamaño de partícula, donde el almidón del tallo también mostró un comportamiento más homogéneo.

La similitud de los picos principales entre ambos materiales confirma que los procesos de extracción fueron eficaces y que el producto obtenido corresponde en mayor medida a almidones nativos. La ligeras variaciones en la intensidad y posición de algunas bandas entre las muestras reflejan las particularidades estructurales propias de cada tipo de residuo. Estas diferencias pueden estar asociadas a la composición heterogénea del material extraído, que incluye almidón en mayor proporción, junto con componentes no amiláceos en menor cantidad, y a las interacciones moleculares presentes en cada matriz vegetal.

8.3.5 Determinación de pH

El pH de los almidones extraídos del plátano macho presentó valores cercanos a la neutralidad, con ligeras diferencias entre las muestras. El almidón de la cáscara mostró un promedio de $5,55 \pm 0,05$, mientras que el almidón del tallo registró un valor ligeramente superior de $6,46 \pm 0,01$.

Estos resultados indican que ambos almidones presentan una tendencia ligeramente ácida a neutra, lo cual es un característico de almidones nativos no modificados. Valores de pH entre 5 y 7 son comunes en matrices amiláceas naturales, debido a la presencia de grupos hidroxilos libres y pequeñas cantidades de compuestos ácidos residuales provenientes del material vegetal.

El almidón del tallo mostró un pH más alto, posiblemente asociado a una menor presencia de compuestos fenólicos o proteínas, mientras que el de la cáscara presentó una ligera acidez que podría deberse a residuos de lignina o pectinas presentes en la pared celular. Estas diferencias reflejan el entorno químico de cada tejido del plátano, coherente con lo reportado en otros estudios sobre almidones obtenidos de fuentes agroindustriales (Dey et al., 2024).

8.3.6 Determinación de solubilidad en almidones de tallo y cáscara de plátano

La evaluación de la solubilidad de los almidones extraídos del tallo y cáscara de plátano macho mostró un comportamiento dependiente de la temperatura. En ambos casos, los porcentajes de solubilidad aumentaron progresivamente hasta alcanzar su valor máximo a 80°C, punto a partir del cual se observó en la Figura 5 disminución a 90°C. Este comportamiento es característico de los almidones nativos, en los que el calentamiento favorece la ruptura parcial de la estructura cristalina de los gránulos, permitiendo la salida de moléculas de amilosa al medio acuoso y, por tanto, un incremento en la solubilidad (Yadav et al., 2017)

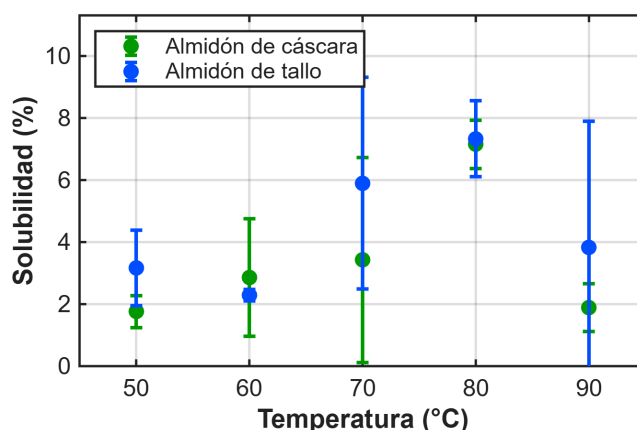


Figura 5. Solubilidad a diferentes temperaturas de almidones extraídos de desechos postcosecha del plátano macho

Fuente: Elaboración propia

La ligera caída observada a 90°C podría atribuirse a fenómenos de retrogradación o agregación de cadenas liberadas, donde parte del material solubilizado tiende a reorganizarse y precipitar, reduciendo la fracción soluble efectiva. Este mismo comportamiento ha sido descrito en otros almidones de origen vegetal, especialmente cuando no han sido sometidos a tratamientos de modificación térmica y química (Kim et al., 2022).

En términos comparativos, el almidón del tallo presentó valores de solubilidad ligeramente mayores que los del almidón de cáscara, especialmente entre 70 y 80°C. Este resultado sugiere una estructura granular más uniforme asociada con compuestos no amiláceos, lo que coincide con su menor variabilidad experimental (por ejemplo, una desviación estándar a 60°C de 2.28 ± 0.184 del tallo frente a 2.85 ± 1.894 en la cáscara). La cáscara en cambio mostró mayores fluctuaciones en los resultados, posiblemente debido a la presencia de restos de lignina, pectinas o proteínas que limitan la liberación homogénea del almidón al medio.

Los resultados demuestran que tanto el almidón del tallo como el de la cáscara exhiben comportamientos típicos de almidones nativos, aunque el primero muestra mayor estabilidad y homogeneidad.

8.3.7 Determinación de poder de hinchamiento de almidones de tallo y cáscara de plátano

El poder de hinchamiento de los almidones extraídos del tallo y de la cáscara del plátano macho fue evaluado a diferentes temperaturas (50, 60, 70, 80 y 90°C). En la figura 6 se observa que ambas muestras alcanzan su máximo poder de hinchamiento alrededor de 80 °C. Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura, donde el incremento de la temperatura favorece la absorción de agua por parte de los gránulos de almidón. A medida que el sistema se calienta, aumenta la movilidad de las cadenas de amilosa y amilopectina, debilitando así parcialmente las zonas cristalinas, lo que permite una mayor expansión de gránulo (R. Jia et al., 2023).

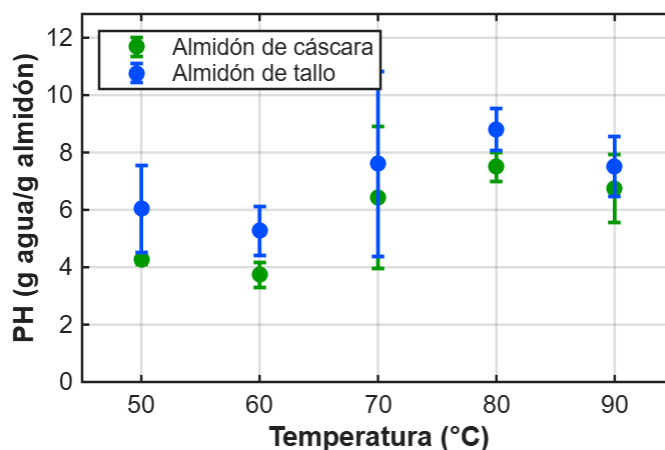


Figura 6. Poder de Hinchamiento (PH) a diferentes temperaturas de almidones extraídos de tallo y cáscara de plátano macho.

Fuente: Elaboración propia

La mayor desviación estándar registrada ($7.60 \pm 3,23$ para el tallo a 70°C) indica una mayor variabilidad en esa condición específica, lo que puede sugerir presencia de impurezas que afectan la capacidad de hinchamiento. En general, el almidón de tallo mostró resultados más consistentes y un ligero desempeño ($8.8 \text{ g agua/g almidón}$ a 80°C) en comparación con la cáscara ($7.5 \text{ g agua/g almidón}$ a 80°C), lo que sugiere una matriz granular de mejor calidad en el tallo, con menor restricción para la absorción de agua.

Los resultados muestran que el poder de hinchamiento aumenta con la temperatura hasta alcanzar un valor máximo alrededor de 80°C , comportamiento que coincide con lo reportado en la literatura para almidones nativos, donde el incremento térmico favorece la penetración de agua y la expansión de los gránulos hasta el punto en que comienzan a modificarse sus zonas cristalinas (E. Subroto et al., 2022). Después de este punto, el hinchamiento puede estabilizarse o presentar ligeras variaciones, asociadas a los cambios estructurales propios del calentamiento sostenido.

8.3.8 Determinación de capacidad de absorción de almidones extraídos de desechos del plátano macho

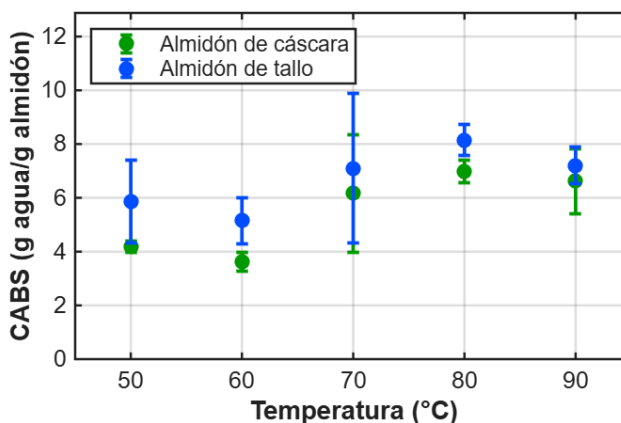


Figura 7. Capacidad de absorción (CABS) del agua a diferentes temperaturas del almidón del tallo y cáscara de plátano macho.

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de absorción de agua muestra un comportamiento dependiente de la temperatura en ambas muestras según la Figura 7. Tanto para la cáscara como para el tallo, el valor máximo se alcanzó a 80°C (cáscara $6,97 \text{ g agua/ g almidón} \pm 0,42$; tallo $8,15 \text{ g agua/ g almidón} \pm 0,57$), lo que indica una mayor afinidad por retener agua en condiciones de calentamiento, coherente con el incremento de movilidad de las cadenas polisacáridas y la apertura estructura granular del almidón. Este patrón (aumento hasta un máximo térmico y estabilización o caída posterior) es típico en almidones nativos y responde al mismo fenómeno físico que gobierna el poder de hinchamiento y la solubilidad.

Las desviaciones más relevantes ocurren alrededor de 70°C, lo que sugiere heterogeneidad estructural. Esa variabilidad puede reflejar diferencias de uniformidad en los gránulos de almidón (tamaño o presencia de residuos lignocelulósicos) que condicionan la capacidad para retener agua.

8.3.9 Determinación de temperatura de gelatinización de almidones extraídos de desechos del plátano macho

Los resultados de temperatura de gelatinización muestran que el almidón de la cáscara gelatiniza a un promedio de $90,5 \pm 2,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el almidón de tallo lo hace $81,5 \pm 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas diferencias observadas en la Tabla 5 reflejan las variaciones estructurales composicionales entre ambos materiales, en especial la proporción de amilosa, amilopectina y compuestos no amiláceos (como lignina o pectinas) presentes en la matriz del gránulo.

Tabla 5. Temperatura de gelatinización de almidones extraídos de desechos de plátano macho.

Muestra	Temperatura de gelatinización promedio (°C)	DE (°C)
Almidón de cáscara	90.5	±2.12
Almidón de tallo	81.5	±3.54

Fuente: Elaboración propia

El valor más alto para la cáscara indica mayor estabilidad térmica, lo que sugiere una estructura granular más ordenada o una red cristalina más fuerte que requiere más energía para desorganizarse durante la gelatinización. Este comportamiento puede atribuirse también a la interacción con fibras residuales o proteínas que restringen la entrada de agua a los gránulos, elevando la temperatura necesaria para iniciar la transición de fase (Kaur et al., 2014)

El almidón de tallo presentó una temperatura de gelatinización más baja, lo que denota una estructura menos cristalina o más accesible al agua, coherente con la mayor homogeneidad y menor contenido de impurezas observadas en otras pruebas, como el índice de blancura y la solubilidad. Estas características hacen que el tallo sea más susceptible a la ruptura térmica favoreciendo aplicaciones donde se requiera gelatinización rápida o parcial, como espesantes de bajo consumo energético.

Las temperaturas obtenidas se encuentran dentro del rango reportado para almidones de plátano (75–95 °C), lo que confirma su naturaleza nativa y su comportamiento similar al de otras fuentes tropicales (Alvis et al., 2013). Estas variaciones confirman que tanto la fuente vegetal como la composición del residuo determinan significativamente la respuesta térmica del almidón, siendo la cáscara más resistente y el tallo más termolábil.

8.4 Mediciones de tasas de difusión y Potencial Zeta entre almidón de tallo-Cáscara, solución buffer y Albúmina de huevo.

8.4.1 Medición de potencial zeta entre muestras de almidones extraídos de desechos del plátano macho, solución buffer y albúmina de huevo.

En las figuras 8, 9 y 10 se presentan los valores de Potencial Zeta (ζ) obtenidos para el almidón de tallo, cáscara y albúmina de huevo, en soluciones buffer fosfato a diferentes pH (6, 7,5 y 9) y concentraciones (0,5, 0,7 y 1% p/v). Los valores negativos observados en todos los casos indican que las partículas presentan carga superficial neta negativa en este medio, lo que favorece la dispersión coloidal al generar fuerzas de repulsión electrostática (Zhout et al., 2020).

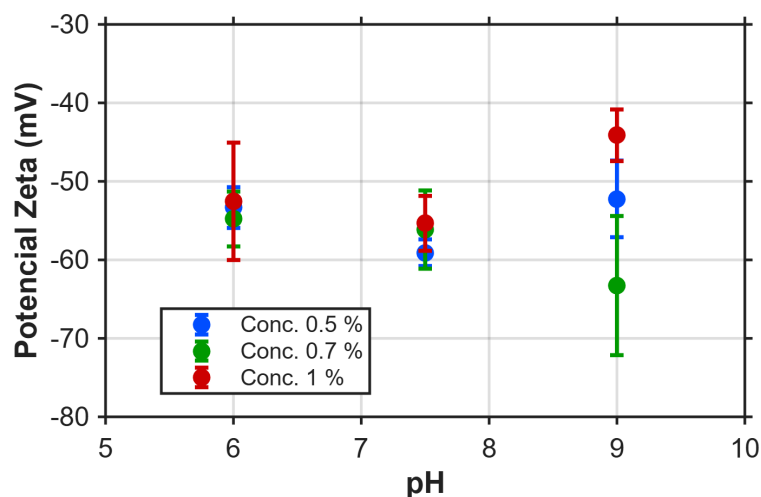


Figura 8. Potencial Zeta (ζ) de almidón de tallo del plátano macho y buffer fosfato
Fuente: Elaboración propia

Para el almidón de tallo, los valores oscilaron entre -52,2 mV y -63, 2 mV, con una ligera disminución de la magnitud del ζ cuando se aumentó el pH de 6 a 9 en la concentración más baja. Sin embargo, en concentraciones mayores (1%) se observó un valor negativo -44.115 mV a pH 9, lo cual puede indicar que a mayor concentración y pH elevado, la carga superficial se ve parcialmente neutralizada o se favorece la formación de agregados coloidales. Esta tendencia es coherente con lo reportado con estudios que muestran que el comportamiento del potencial es dependiente del pH y de la fuerza iónica del medio: a pH más alto la magnitud negativa tiende a disminuir, reduciendo la repulsión y favoreciendo la agregación (Zhang et al., 2025).

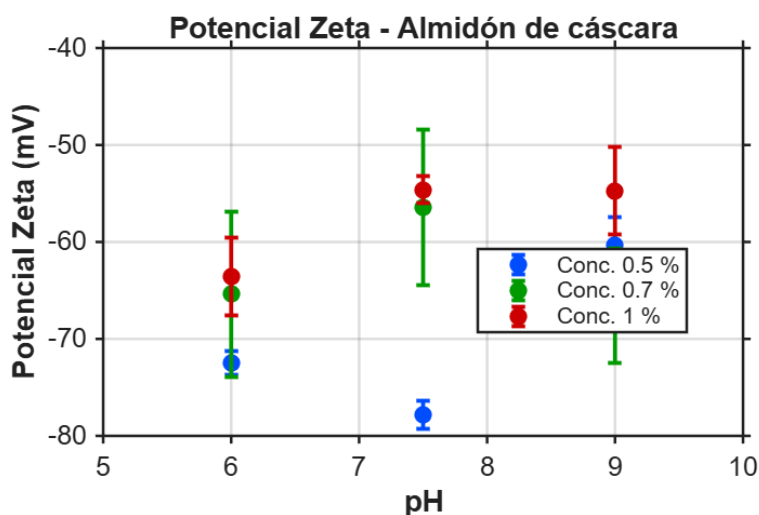


Figura 9. Potencial Zeta (ζ) de almidón de cáscara del plátano macho y buffer fosfato
Fuente: Elaboración propia

En cuanto al almidón de cáscara, se registraron valores negativos entre -54,6 mV y -77.8 mV aproximadamente. Este valor sugiere que las partículas de almidón de cáscara podrían tener más grupos funcionales ionizables o una mayor carga superficial debido a restos de material vegetal no puro, lo que incrementa la repulsión coloidal. No obstante, la variabilidad entre concentraciones y pH demuestra que la dispersión coloidal es más sensible a las condiciones de concentración en esta muestra, lo que podría reflejar una menor uniformidad en la superficie de los gránulos.

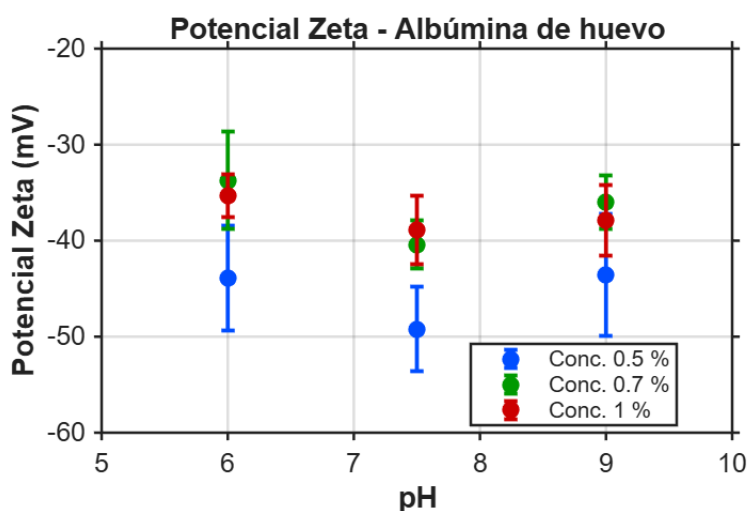


Figura 10. Potencial Zeta (ζ) de proteína Albúmina de clara de huevo y buffer fosfato
Fuente: Elaboración propia

La albúmina de huevo por su parte, presenta valores mucho menos negativos (entre 33,7 mV y 49,2 mV) en comparación con los almidones. Esto refleja que las proteínas aunque cargadas negativamente a pH mayor que su punto isoeléctrico (≈ 4.5 en la albúmina), producen dispersión coloidal con menor repulsión superficial que los gránulos de almidón en las condiciones estudiadas. En sistemas de mezcla proteína-almidón se ha documentado que valores de ζ más negativos indican mayor estabilidad de dispersión, mientras que valores cercanos a cero favorecen la agregación o coalescencia (Hassan et al., 2022)

En este estudio, el almidón de cáscara alcanzó las cifras más negativas, lo que en teoría sugiere mayor estabilidad coloidal; sin embargo, su mayor variabilidad entre condiciones experimentales indica que esta estabilidad no es uniforme.

8.4.2 Evaluación de respuesta difusiva de almidones de tallo, cáscara de plátano macho y albúmina bajo variación de pH y concentración.

El análisis de las difusividades efectivas de los almidones extraídos del tallo y cáscara del plátano macho, así como el de la albúmina de huevo, se estudiaron bajo la variación de concentración y pH. Las mediciones se realizaron mediante dispersión de luz dinámica (DLS), técnica que sólo permite trabajar en concentraciones extremadamente bajas.

Los resultados mostraron que la concentración dentro del rango impuesto (0.5, 0.7 y 1% p/v), no generó una variación apreciable en las difusividades. Esto se explica por la baja interacción entre partículas en condiciones de dilución grande. El pH influye como la variable dominante, modificando la agregación, el tamaño hidrodinámico y la dispersión de los sistemas (Hassan et al., 2022).

Con el fin de explicar los fenómenos fisicoquímicos, se aplicaron modelos de correlación en sistemas poliméricos diluidos. El primer enfoque consistió en utilizar la forma linealizada del modelo Phillies, cuyo propósito era obtener parámetros de D_0 y α (Ecuación. 11)

$$D_{ij} = D_0 e^{-\alpha C_i} \quad (11)$$

Donde D_0 se conoce como la difusión en el límite de concentración ($C \rightarrow 0$), α el parámetro de medición de movilidad de la partícula respecto a la concentración y C_i , la concentración evaluada por especie.

Los valores obtenidos permiten interpretar la movilidad idealizada de las partículas bajo condiciones diluidas y el grado de interacción residual aún en bajas concentraciones como se evidencia en la Figura 11 (Phillies, 2016).

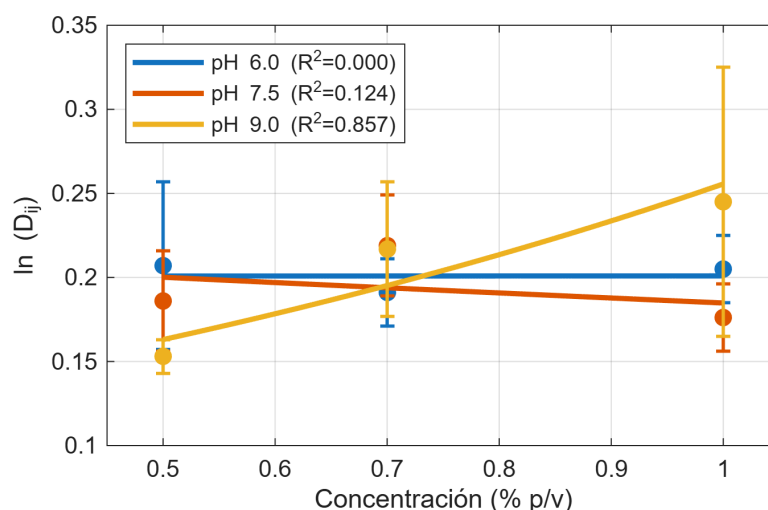


Figura 11. Modelo de Phillies para interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Resultados de Phillies lineal de interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato

Ajuste phillies $\ln D_{ij}$ vs C_i			
AJUSTE TALLO	pH 6	pH 7,5	pH 9
D_0 (μ^2/s)	0.20076	0.21672	0.104
α ($\% p/v^{-1}$)	-0.00073	0.15932	-0.8992
R^2	0.0002	0.12445	0.85707

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del modelo de Phillies para el almidón de tallo evidencian un comportamiento dependiente del pH y reflejan la complejidad estructural del sistema. Como se observa en la Tabla 6, en pH 6 el valor de D_0 es relativamente bajo y el parámetro α toma valores cercanos a cero, lo que indica una débil dependencia de la difusividad con la concentración en el rango analizado. En este caso, el bajo valor de $R^2 \approx 0$ sugiere que el modelo no describe adecuadamente los datos experimentales, lo que podría estar asociado a una elevada dispersión experimental o a una heterogeneidad en el sistema que dificulta la identificación de una tendencia clara.

En pH 7.5 se visualiza un incremento de D_0 a un valor de $0.21672 \mu m^2/s$, acompañado de α positivo. Esto indica que la difusividad disminuye al aumentar la concentración, lo cual sugiere que a este pH existen interacciones hidrodinámicas moderadas o una mayor obstrucción al movimiento debido a interacciones entre gránulos o complejos amilosa-amilopectina parcialmente reorganizados. Aunque el ajuste sigue siendo débil, estos valores muestran un sistema menos caótico que en pH 6.

Ya en pH 9 ocurre un comportamiento más consistente donde D_0 disminuye, esto sugiere que a concentración teórica cero, los gránulos aún presentan cierta estructura rígida o densidad interna. El α es notablemente negativo, esto implica que la difusividad aumenta con la concentración, fenómeno asociado a la repulsión electrostática o expansión de las cadenas bajo condiciones alcalinas.

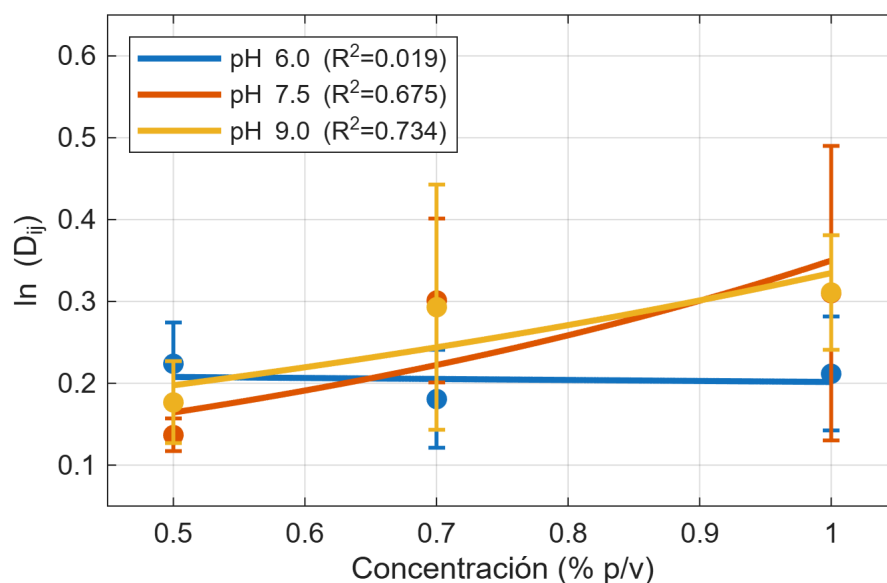


Figura 12. Modelo de Phillies para interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Resultados de Phillies lineal de interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato

Ajuste phillies $\ln D_{ij}$ vs C_i			
AJUSTE CÁSCARA	pH 6	pH 7,5	pH 9
D_0 (μ^2/s)	0.214	0.0772	0.1166
α ($\% p/v^{-1}$)	0.0598	-1.512	-1.054
R^2	0.01851	0.67487	0.73378

Fuente: Elaboración propia

Como se es visualizado en la Tabla 7 y Figura 12, en pH 6 el D_0 es alto y α positivo, indicando que la difusión disminuye ligeramente con la concentración debido a interacciones hidrodinámicas débiles. Sin embargo, el R^2 muestra que el sistema es altamente irregular, probablemente porque la cáscara contiene estructuras más complejas o restos de matriz vegetal que afectan la movilidad de las partículas.

A pH 7.5 se observa un cambio marcado en el comportamiento del sistema. D_0 disminuye hasta $0.0772 \mu^2/s$ y el parámetro α adopta valores negativos, lo que indica una dependencia inversa de

la difusividad con la concentración en el rango analizado. En estas condiciones, el ajuste del modelo mejora, lo que sugiere una tendencia más consistente en la respuesta del sistema. Este resultado evidencia que el almidón de cáscara presenta una mayor sensibilidad a los cambios de pH en comparación con el tallo, al menos dentro del intervalo de concentraciones evaluado.

A pH 9, el valor de D_0 aumenta ligeramente mientras que el parámetro α permanece negativo, indicando que la dependencia inversa de la difusividad con la concentración se mantiene en condiciones alcalinas. En este caso, el ajuste del modelo es más consistente, lo que sugiere un comportamiento más regular del sistema dentro del rango de concentraciones analizado. Estos resultados indican que, a pH alcalino, la respuesta del sistema es más predecible desde el punto de vista del modelo.

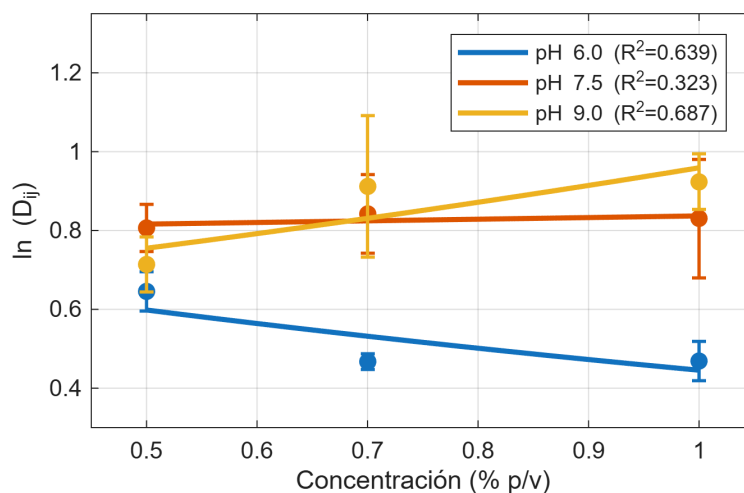


Figura 13. Modelo de Phillis para interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Resultados de Phillis lineal de interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato

Ajuste phillies $\ln D_{ij}$ vs C_i			
AJUSTE ALBÚMINA	pH 6	pH 7,5	pH 9
D_0 (μ^2/s)	0.80332	0.795997	0.59442
α (% p/v^{-1})	0.58927	-0.05027	-0.47839
R^2	0.63922	0.32268	0.68718

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de la albúmina en la Figura 13 y Tabla 8 mostró una respuesta más definida frente al modelo de Phillis en comparación con los almidones, pero dependiente del pH.

En pH 6, el valor de D_0 fue el más alto entre todas las condiciones evaluadas, lo que indica que la proteína presenta su mayor difusividad en ausencia de efectos de concentración en condiciones ligeramente ácidas. En este mismo pH, el coeficiente $\alpha = 0.58927 \% p/v^{-1}$ fue positivo, señalando un incremento notable de la resistencia hidrodinámica conforme aumenta la concentración. Esto sugiere una mayor probabilidad de interacciones proteína-proteína, posiblemente por efectos electrostáticos que favorecen colisiones y formación de estructuras transitorias.

A pH 7.5 se observa un cambio en la respuesta del sistema. Aunque el valor de D_0 se mantiene cercano al observado a pH 6 ($D_0 = 0.795997 \mu^2/s$), lo que indica que la difusividad extrapolada a dilución infinita no varía de forma significativa, el parámetro α toma valores cercanos a cero, reflejando una débil dependencia de la difusividad con la concentración en el rango analizado. El bajo valor de R^2 sugiere que, bajo estas condiciones, el modelo no describe adecuadamente el comportamiento experimental de la albúmina, lo que podría estar asociado a una mayor dispersión de los datos o a cambios en el régimen de interacción del sistema.

A pH 9 se observa un comportamiento más consistente del sistema. El valor de D_0 disminuye respecto a pH 7.5, mientras que el parámetro α permanece negativo, indicando que la dependencia inversa de la difusividad con la concentración se mantiene en condiciones alcalinas. En este caso, el ajuste del modelo mejora notablemente ($R^2 = 0.68718$), lo que sugiere una respuesta más regular y predecible del sistema dentro del rango de concentraciones analizado, en comparación con el comportamiento observado a pH 7.

Por tanto, el modelo linealizado de Phillies describe de manera más adecuada el comportamiento del sistema a pH 9, donde datos experimentales muestran una respuesta más consistente dentro del rango de concentraciones analizado, en comparación con otros valores de pH (Iselau et al., 2016).

Con el fin de evaluar un modelo con base hidrodinámica más explícita, se usó el modelo de Zimm, tradicionalmente utilizado para polímeros lineales y monodispersos en solución diluida (Zimm, 1956). Aunque los almidones presentes en este estudio distan considerablemente de esa condición ideal (debido a su polidispersidad, ramificación y posible presencia de lignina y agregados), el ajuste se realizó con el propósito de identificar si en algún rango el sistema exhibía una tendencia semejante a la de un polímero ideal. El modelo de Zimm proporciona una perspectiva hidrodinámica más explícita, ya que incorpora términos asociados a fricción intrínseca (A_0), interacciones hidrodinámicas (A_1) y el exponente m , que describe el régimen de interacción.

$$D_{ij} = A_0 + A_1 C^m \quad (12)$$

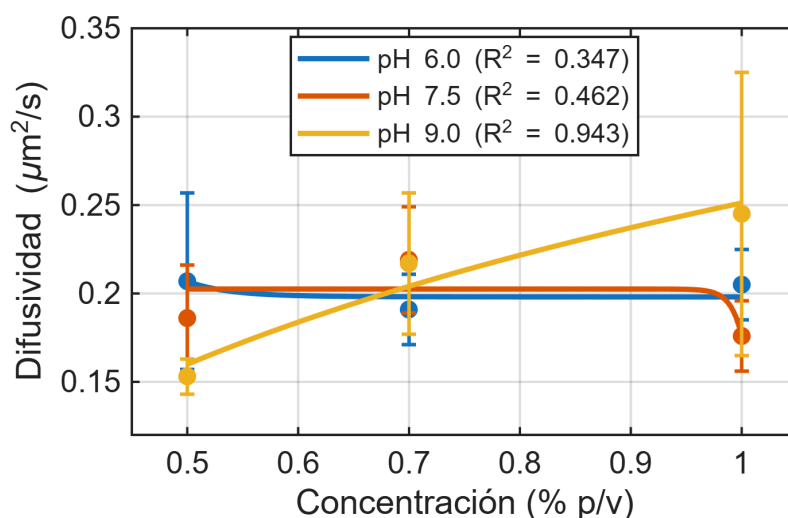


Figura 14. Modelo de Zimm para interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Resultados de modelo Zimm de interacción de Almidón de tallo y Buffer fosfato

Ajuste Zimm			
AJUSTE TALLO	pH 6	pH 7,5	pH 9
$A_o (\mu^2/s)$	0.198	0.2025	-5.8015
$A_1 (\frac{\mu^2/s}{\%p/v})$	0	-0.0265	6.0527
m	-13.5301	99.5319	0.019
R^2	0.347	0.462	0.943

Fuente: Elaboración propia

Para el almidón del tallo, los resultados presentados en la Figura 14 y la Tabla 9 muestran que a pH 6 el modelo de Zimm presenta un ajuste deficiente, acompañado de un valor negativo del parámetro m , lo que indica que el modelo no describe adecuadamente la dependencia hidrodinámica del sistema con la concentración bajo estas condiciones. A pH 7.5, el ajuste mejora; sin embargo, el parámetro m alcanza valores elevados, lo que sugiere una respuesta menos regular del sistema dentro del marco del modelo. En contraste, a pH 9 el modelo presenta un ajuste adecuado, con valores de m más consistentes con los supuestos del modelo en el rango de concentraciones analizado (Iselau et al., 2016), reflejando un comportamiento hidrodinámico más regular desde el punto de vista del ajuste.

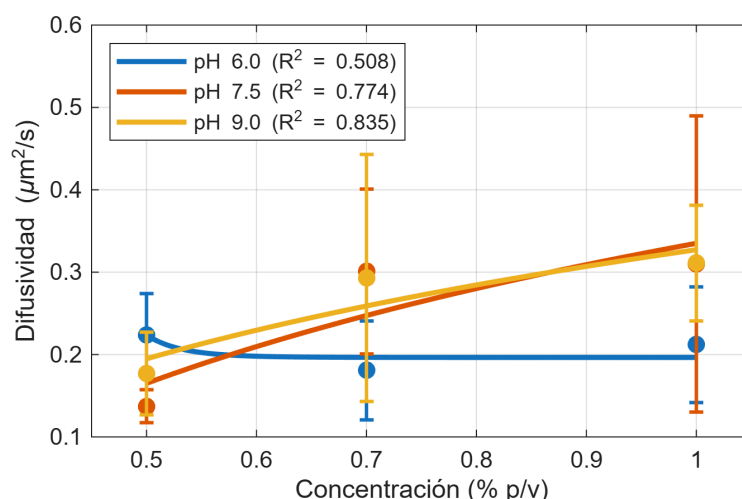


Figura 15. Modelo de Zimm para interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Resultados de modelo Zimm de interacción de Almidón de cáscara y Buffer fosfato

AJUSTE CÁSCARA	Ajuste Zimm		
	pH 6	pH 7,5	pH 9
$A_0 (\mu^2/s)$	0.1965	-16.1187	-12.0207
$A_1 (\frac{\mu^2/s}{\%p/v})$	0	16.4537	12.348
m	-15.988	0.0155	0.0155
R^2	0.508	0.774	0.835

Fuente: Elaboración propia

En el caso del almidón de la cáscara, los resultados presentados en la Figura 15 y la Tabla 10 muestran una marcada dependencia del ajuste con el pH: a pH 6 el modelo de Zimm presenta un desempeño deficiente, mientras que a pH 7.5 y 9 el ajuste mejora de forma notable. En estas condiciones, los coeficientes A_0 y A_1 adoptan valores que no admiten una interpretación física directa, lo que indica una limitada capacidad del modelo para describir ciertos aspectos del sistema. No obstante, la relativa consistencia del exponente m en condiciones alcalinas (≈ 0.0155) sugiere que, dentro del marco del modelo, el comportamiento hidrodinámico del sistema es más regular en comparación con pH más bajos.

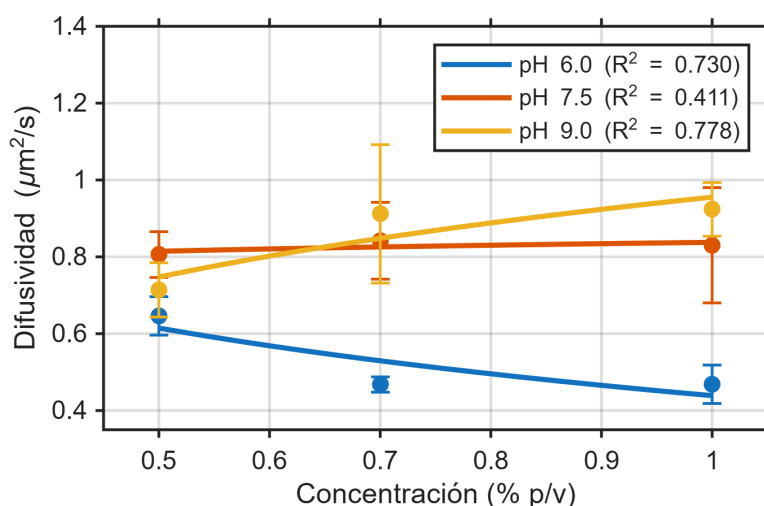


Figura 16. Modelo de Zimm para interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resultados de modelo Zimm de interacción de Albúmina de huevo y Buffer fosfato

Ajuste Zimm			
AJUSTE ALBÚMINA	pH 6	pH 7,5	pH 9
$A_0 (\mu^2/s)$	21.4664	-3.2154	-25.8123
$A_1 (\frac{\mu^2/s}{\%p/v})$	-21.0276	4.0532	26.7677
m	0.0121	0.0083	0.0112
R^2	0.73	0.411	0.778

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la albúmina (Figura 16 y Tabla 11) los valores de R^2 fueron altos en pH 6 y 9, mientras que en pH 7.5 el ajuste disminuyó, indicando mayor dispersión de los datos. Aún así, los exponentes m permanecieron en rangos muy pequeños (0.0083 -0.0121), coherentes con comportamientos típicos de soluciones diluidas, donde la dependencia de la difusividad con la concentración es prácticamente nula.

La comparación entre los dos modelos permite establecer un patrón consistente: bajo las condiciones experimentales del DLS, la concentración no ejerce un efecto significativo sobre la movilidad hidrodinámica, mientras que el pH sí modifica de forma marcada la respuesta difusiva de los sistemas.

Aunque a pH ácido y neutro (6 y 7.5) se observa una menor movilidad hidrodinámica reflejada en valores reducidos de difusividad, esto no implica necesariamente una baja estabilidad electrostática ni debe interpretarse como contradictorio con los resultados de potencial zeta. Ambas mediciones describen aspectos distintos del sistema: la difusión caracteriza la movilidad hidrodinámica, mientras que el potencial zeta informa sobre la estabilidad electrostática, por lo que pueden presentar comportamientos no coincidentes bajo las mismas condiciones.

Estas condiciones pueden dar lugar a respuestas hidrodinámicas efectivas que reflejan el comportamiento promedio del sistema, sin permitir distinguir entre contribuciones de especies individuales o asociaciones transitorias. En este sentido, estudios previos han reportado que variaciones en el pH pueden afectar la organización de biopolímeros en solución, influyendo en su comportamiento hidrodinámico medido mediante técnicas como DLS (Murphy et al., 2010; Farías et al., 2010). No obstante, dichos trabajos se citan aquí como referencia contextual y no como evidencia directa de los mecanismos presentes en el sistema estudiado..

A pH 9 se observa un cambio en la respuesta del sistema, consistente con una mayor repulsión electrostática reflejada en los valores de potencial zeta y con una mayor solubilidad de las macromoléculas. En estas condiciones, las mediciones hidrodinámicas muestran un comportamiento más regular, y los ajustes de los modelos de Phillies (lineal) y Zimm presentan mayores coeficientes de determinación. Esta mayor consistencia entre propiedades electrostáticas, de solubilidad y de movilidad sugiere un régimen de transporte más predecible dentro del rango de concentraciones analizado, lo que motiva la adopción de un enfoque de transporte multicomponente, como el formalismo de Maxwell–Stefan, para describir la difusión en estos sistemas.

Aunque los modelos utilizados no describen de manera explícita los mecanismos físicos del sistema, permiten establecer relaciones consistentes entre pH, estabilidad coloidal y movilidad hidrodinámica dentro del rango experimental analizado. En este sentido, los resultados aportan un marco comparativo útil para interpretar el comportamiento difusivo de macromoléculas provenientes de residuos agroindustriales.

8.4.3 Difusividades de Maxwell - Stefan en sistema de almidones de desechos postcosecha del plátano macho y proteína modelo a un pH específico.

Para la estimación de los coeficientes binarios de difusión binaria (D_{ab}) de los sistemas almidón de tallo - Buffer fosfato, almidón de cáscara - Buffer fosfato y albúmina de huevo - buffer fosfato, se evaluaron los modelos hidrodinámicos de Phillies y Zimm utilizando los datos experimentales de difusividad obtenidos mediante DLS. En esta etapa fue necesario seleccionar tanto el modelo adecuado como las condiciones experimentales bajo las cuales la estimación de D_{ab} fuera físicamente coherente y compatible con supuestos de la teoría de Maxwell-Stefan.

Aunque inicialmente se evaluaron tanto el modelo de Phillies como el de Zimm, solo el primero

resultó apto para estimar las difusividades binarias. Esto se debe a que, en el modelo de Zimm, el parámetro equivalente a la difusividad a dilución infinita (A_0) arrojó valores no físicos (negativos) para las tres muestras de pH 9 (Tablas 9, 10 y 11). Esto demuestra que el modelo no es compatible con la naturaleza de los sistemas estudiados, pues la difusividad negativa carece de sentido físico y refleja un sobreajuste. Este tipo de inconsistencias ya han sido reportadas en sistemas coloidales polidispersos y fuertemente estructurados.

El modelo de Phillies produjo valores de D_0 positivos y coherentes con la magnitud esperada para partículas mesoescalares en agua, y además mostró mejor desempeño en pH 9, donde el ajuste alcanzó valores de R^2 entre 0.73 y 0.85 para las tres muestras. Esto coincide con la literatura que establece Phillies, puesto que el modelo es particularmente robusto para describir la dependencia de la difusividad en sistemas poliméricos o biopolímeros bajo efectos hidrodinámicos moderados (Phillies, 2016). Por tanto, el modelo de Phillies fue el único capaz de proporcionar valores físicamente interpretables de D_0 , razón por la cual se seleccionó como base para estimar las difusividades binarias D_{ab} .

El modelo de Phillies describe la disminución de la difusividad con la concentración mediante la Ecuación 11. Para la teoría de Maxwell-Stefan, los coeficientes binarios se definen explícitamente en el límite de la dilución infinita, esto implica:

$$D_{ab} = D_0 \quad (13)$$

El uso de la formulación completa incorporaría explícitamente efectos de concentración, como crowding, interacciones hidrodinámicas y colisiones entre especies, dando lugar a una difusividad efectiva dependiente del estado del sistema. Esta distinción entre difusividades efectivas y coeficientes de difusión intrínsecos del formalismo de Maxwell-Stefan está documentada en la literatura clásica de transporte en soluciones multicomponente (Krishna & Wesselingh, 1997). Por ello, la difusividad binaria de Maxwell-Stefan D_{ij} debe estimarse a partir de D_0 , y únicamente bajo condiciones en las que la extrapolación a dilución infinita es válida, como ocurre en pH 9.

Tabla 12. Difusividades binarias ajustadas según pH 9.

Muestra	$D_{ab} (\mu^2/s)$
Almidón Tallo - Agua	0.104
Almidón Cáscara - Agua	0.1166
Albúmina de huevo - Agua	0.59442

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 12 son coherentes con el orden esperado de las difusividades de partículas mesoescalares, la diferencia entre los sistemas polisacárido-agua es que son más lentos y la proteína -agua más rápido.

Una vez determinadas las difusividades binarias mediante el ajuste, se empleó el modelo simplificado de Kooijman y Taylor para estimar los coeficientes binarios de difusión de Maxwell-Stefan entre solutos. Este modelo permite calcular D_{ab} a partir de la combinación de dos difusividades individuales bajo el supuesto de dilución infinita (Ecuación 14).

$$\overline{D}_{ij}^{xk \rightarrow 1} = \sqrt{D_{ik}^{xk \rightarrow 1} D_{jk}^{xk \rightarrow 1}} \quad (14)$$

El hecho de que este modelo no requiera información termodinámica detallada, como coeficientes de actividad o potenciales químicos, lo convierte en una alternativa operativa cuando dichos parámetros no están disponibles, como ocurre frecuentemente en sistemas alimentarios o polímeros complejos (Krishna & Wesselingh, 1997). En este enfoque, las difusividades D_0 se emplean como parámetros de referencia asociados a la movilidad extrapolada a dilución infinita, permitiendo una descripción simplificada del transporte sin introducir explícitamente efectos termodinámicos

Tabla 13. Difusividades binarias entre solutos (Maxwell Stefan) a pH 9.

Muestra	$\overline{D}_{ij}$ (μ^2/s)
Almidón Tallo - Cáscara	0.0550
Almidón Cáscara - Albúmina	0.0885
Albúmina - Almidón Tallo	0.0975

Fuente: Elaboración propia

Según los valores reportados en la Tabla 13, los coeficientes binarios de Maxwell–Stefan presentan diferencias claras entre las distintas parejas de solutos a pH 9. Las combinaciones que involucran albúmina muestran valores mayores de $\overline{D}_{ij}$, lo que indica una mayor movilidad relativa dentro del marco del formalismo adoptado. En contraste, la pareja almidón tallo–cáscara presenta el menor coeficiente, reflejando una interacción binaria con mayor resistencia efectiva al transporte.

Estos resultados evidencian la consistencia interna del enfoque empleado y proporcionan valores operativos de la movilidad difusiva binaria entre los polímeros estudiados. Al estar basados en condiciones de pH que favorecen la repulsión electrostática y un comportamiento más regular del sistema, los coeficientes obtenidos constituyen una aproximación adecuada para describir el transporte binario dentro del formalismo de Maxwell–Stefan bajo los supuestos adoptados.

9. CONCLUSIONES

La caracterización de los almidones permitió establecer que el origen del residuo influye en su desempeño funcional. El almidón del tallo mostró un comportamiento más uniforme y reproducible en comparación con el de la cáscara, el cual presentó una respuesta más variable asociada a la presencia de componentes no amiláceos. Estas diferencias se reflejaron en una mayor regularidad hidrodinámica y menor variabilidad difusiva en el almidón del tallo frente al de la cáscara. En conjunto, ambos residuos constituyen fuentes viables de almidón, aunque con potenciales tecnológicos diferenciados.

Los experimentos mostraron que el pH es la variable de control dominante en el comportamiento difusivo de los tres solutos evaluados. Dentro del rango experimental accesible mediante DLS, la concentración no produjo variaciones significativas en la difusividad, en concordancia con condiciones de dilución elevada. Los valores de difusividad obtenidos indicaron que a pH 6 y 7.5 la movilidad hidrodinámica es menor en comparación con pH 9, sin que ello implique necesariamente inestabilidad coloidal. En contraste, a pH 9 se observó una mayor movilidad hidrodinámica y un comportamiento más regular del sistema. Estas tendencias fueron comunes a los tres materiales estudiados, aunque el almidón de cáscara presentó una mayor dispersión de los resultados.

El uso de los modelos de Phillies y Zimm permitió analizar la dependencia de la difusividad con la concentración y evaluar la consistencia del comportamiento hidrodinámico de los sistemas estudiados. En particular, el modelo de Phillies permitió obtener el parámetro D_0 , correspondiente a la difusividad extrapolada a dilución infinita, el cual mostró un comportamiento consistente bajo condiciones alcalinas. En contraste, el modelo de Zimm evidenció limitaciones en la descripción de los datos experimentales, reflejadas en parámetros que no admiten una interpretación física directa dentro del marco del modelo.

A partir de los valores de D_0 , fue posible estimar coeficientes de difusión de Maxwell–Stefan como parámetros operativos para describir el transporte binario entre los solutos estudiados. Estos coeficientes permiten representar la movilidad relativa dentro del formalismo de Maxwell–Stefan bajo condiciones de dilución elevada, y constituyen una base cuantitativa para el modelado del transporte de masa en sistemas biopoliméricos dentro de los supuestos adoptados.

La comparación entre almidones y albúmina mostró que las parejas que involucran a la proteína

presentan coeficientes de difusión de Maxwell–Stefan mayores, lo que indica una mayor movilidad relativa dentro del marco del formalismo adoptado.

En contraste, los almidones, particularmente el de cáscara, mostraron valores de tamaño hidrodinámico aparente mayores y una mayor sensibilidad al pH. En sistemas que combinan almidones y albúmina, las mediciones reflejan una respuesta hidrodinámica efectiva del conjunto, sin que sea posible atribuir de manera directa el control de la movilidad a un soluto específico. Estos resultados resaltan la utilidad de técnicas como DLS para explorar el comportamiento hidrodinámico de mezclas polímero–proteína bajo distintas condiciones de pH.

Los resultados obtenidos delimitan un marco experimental específico y abren líneas claras para trabajos futuros orientados a ampliar el rango de condiciones y la complejidad de los sistemas estudiados:

- Evaluar rangos de concentración más amplios con técnicas complementarias (rheología, FRAP, NMR-D).
- Estudiar interacciones reales entre almidón y proteína en condiciones de procesamiento como gelificación, calentamiento, cizallamiento
- Validar los parámetros difusivos en sistemas multicomponentes más complejos.
- Optimizar la extracción del almidón de cáscara para reducir su polidispersidad y mejorar su aplicabilidad.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, S., Enríquez, M. A., & Uvidia, H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/366205033_Residuos_agroindustriales_su_impacto_manejo_y_aprovechamiento
- Alejandro, T. a. L., Tran, T., Ernesto, S. a. G., & Vanesa, C. V. K. (2023). Uso, demanda y prospectiva de la producción de yuca en Colombia.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/38567>
- Arnol, A. H. (2019). Formulación del plan de manejo ambiental de la rallandería “La Niña” en la vereda Peña Blanca del municipio de Rosas.
<https://repositorio.uniautonomia.edu.co/handle/123456789/268>
- Agama-Acevedo, E., Flores-Silva, P. C., & Bello-Perez, L. A. (2018). Cereal starch production for food applications. In *Elsevier eBooks* (pp. 71–102).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809440-2.00003-4>
- Álvarez, A. M. P., Bustos, C. R. B., Hernández, L., & Muñoz, L. (2018). Emulsiones tipo pickering a base de almidones modificados como agentes emulsificantes. Artículo de revisión. *Revista De Investigación*, 11(1), 127–139.
<https://doi.org/10.29097/2011-639x.185>
- Alvis, A., Vélez, C., & Arrázola, G. (2013). Propiedades térmicas y de pasta del almidón de plátano verde (*Musa paradisiaca*). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 66(2), 7127–7136.
- A. Fick, “Ueber Diffusion,” *Annalen der Physik*, vol. 170, pp. 59-86, 1855
- Blanco, G., Linares, B., Hernández, J., Maselli, A., Rincón, A., Ortega, R., Medina, E., Hernández, L., & Morillo, J. (2013). Caracterización química de lixiviados de pseudotallos y láminas foliares de plátano "Hartón" en el estado Yaracuy. *Agronomía Tropical*, 63, 121-134. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/459991>.
- Burken, O., & Sommer, S. (2024). Evaluation of protein–polysaccharide interactions through ζ -potential and particle size measurements to assess their functionality in wine. *Journal of Food Science*, 89(10), 6413–6424. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17350>

- Carter, D. C., & Ho, J. X. (1994). Structure of Serum Albumin. *Advances in Protein Chemistry*, 45, 153–203. [https://doi.org/10.1016/s0065-3233\(08\)60640-3](https://doi.org/10.1016/s0065-3233(08)60640-3)
- Chen, H. (2014). *Biotechnology of Lignocellulose. Theory and Practice*. Chemical Industry Press and Springer.
- Cordeiro, N., Belgacem, M., Torres, I., & Moura, J. (2004). Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems. *Industrial Crops and Products*, 19(2), 147-154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.09.001>.
- Chávez, A., Bello, L., Agama, E., Castellanos, F., Álvarez, C., & Pacheco, G. (2017). Isolation and partial characterization of starch from banana cultivars grown in Colombia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 240-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.024>.
- CIAT (1995) La industria de almidón en Colombia. [66261 C.3 La Industria del almidón en el departamento del Cauca, Colombia.pdf](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.024)
- Cortés-Morales, E. A., Mendez-Montevalvo, G., & Velazquez, G. (2021). Interactions of the molecular assembly of polysaccharide-protein systems as encapsulation materials. A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 295, 102398. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102398>
- Connor, N. (2023). Almidón | Fórmula, propiedades y aplicación. *Material Properties*. <https://material-properties.org/es/almidon/>
- Cuevas, K. T., Castillejos, G. R., Gallardo, J. R., Ortega, C. L., & Jiménez, C. H. (2024). Almidón, una plataforma versátil en la industria de alimentos. *Revista Boliviana De Química*, 41(1). <https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.1.6>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020) Comercio internacional. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/comercio-internacional/importaciones> .
- Dey, A., Dutta, D., Singh, A., & Sit, N. (2024). Physicochemical and functional properties of starches isolated from different millets. *Measurement Food*, 15, 100188. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2024.100188>
- Dickinson, E. (2008). Interfacial structure and stability of food emulsions as affected by protein–polysaccharide interactions. *Soft Matter*, 4(5), 932. <https://doi.org/10.1039/b718319d>

- Dickinson, E. (2002). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 25–39. [https://doi.org/10.1016/s0268-005x\(01\)00120-5](https://doi.org/10.1016/s0268-005x(01)00120-5)
- Doublier, J., Garnier, C., Renard, D., & Sanchez, C. (2000). Protein–polysaccharide interactions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 5(3–4), 202–214. [https://doi.org/10.1016/s1359-0294\(00\)00054-6](https://doi.org/10.1016/s1359-0294(00)00054-6)
- Espinoza Guerra, Í., Montenegro Vivas, L., Sánchez Laiño, A., et al. (2019). Composición bromatológica y degradabilidad ruminal in situ de residuos agroindustriales de maracuyá (*Passiflora edulis*) y plátano (*Musa paradisiaca*). *Ciencia y Tecnología*, 10(2).
- Farías, M., Martínez, M., & Pilosof, A. (2009). Casein glycomacropeptide pH-dependent self-assembly and cold gelation. *International Dairy Journal*, 20(2), 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.09.002>
- Freitas, R. A., P. C. Paula, J. P. A. Feitosa, S. Rocha, and M. R. Sierakwski. (2004). Amylose contents, rheological properties and gelatinization kinetics of yam (*Discorea alata*) and Cassava (*Manihot utilissima*) starches. *Carbohydr. Polym.* 55: 3-8.
- Gentile, L. (2020). Protein–polysaccharide interactions and aggregates in food formulations. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 48, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.03.002>
- Gil-Campos, M., González, M. S. J., & Martín, J. D. (2015). Uso de azúcares y edulcorantes en la alimentación del niño. Recomendaciones del Comité de Nutrición de la Asociación Española de Pediatría. *Anales De Pediatría*, 83(5), 353.e1-353.e7. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2015.02.013>
- Gómez-Soto, J. A., Sánchez-Toro, Ó. J., & Matallana-Pérez, L. G. (2019). Residuos urbanos, agrícolas y pecuarios en el contexto de las biorrefinerías. *Revista Facultad De Ingeniería*, 28(53), 7–32. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9705>
- González, J (2023) Fenómenos de transporte en la extracción de almidón de plátano macho en un tanque agitado. . <https://ru.dgb.unam.mx/handle/20.500.14330/TES01000849073>
- Hassan, N. A., Darwesh, O. M., Smuda, S. S., Altemimi, A. B., Hu, A., Cacciola, F., Haoujar, I., & Abdelmaksoud, T. G. (2022). Recent trends in the preparation of Nano-Starch particles. *Molecules*, 27(17), 5497. <https://doi.org/10.3390/molecules27175497>
- Hernández-Carmona, F., Morales-Matos, Y., Lambis-Miranda, H., & Pasqualino, J. (2017). Starch

- extraction potential from plantain peel wastes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4980–4985. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.034>
- INACAL. (2018). Norma Técnica Peruana NTP 209.067: Almidón — Determinación de humedad por método gravimétrico. Instituto Nacional de Calidad del Perú [Norma Técnica NTP 209.067 Peruana 1974 \(Revisada El 2018\) : 2018-06-27 1 Edición | PDF | Trigo | Perú](https://www.inacal.gob.pe/Documentos/NTP/NTP209067.pdf)
- Iselau, F., Xuan, T. P., Trefalt, G., Matic, A., Holmberg, K., & Bordes, R. (2016). Formation and relaxation kinetics of starch–particle complexes. *Soft Matter*, 12(47), 9509–9519. <https://doi.org/10.1039/c6sm01312k>
- Jia, R., Cui, C., Gao, L., Qin, Y., Ji, N., Dai, L., Wang, Y., Xiong, L., Shi, R., & Sun, Q. (2023). A review of starch swelling behavior: Its mechanism, determination methods, influencing factors, and influence on food quality. *Carbohydrate Polymers*, 321, 121260. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121260>
- Julio, R., Albet, J., Vialle, C., Vaca, C., & Sablayrolles, C. (2017). Sustainable design of biorefinery processes: existing practices and new methodology. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(2), 373-395. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bbb.1749](https://doi.org/10.1002/bbb.1749)
- Karvinen, P., Oksman, A., Silvennoinen, R., & Mikkonen, H. (2006). Complex refractive index of starch acetate used as a biodegradable pigment and filler of paper. *Optical Materials*, 29(9), 1171–1176. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2006.03.041>
- Kaur, L., Singh, J., Singh, N., & McCarthy, O. J. (2014). Starch gelatinization and its effect on physicochemical properties—a review. *Food Hydrocolloids*, 35, 1–15.
- Khushbu, S., Sunil, C. K., Chidanand, D. V., & Jaganmohan, R. (2020). Effect of particle size on compositional, structural, rheological, and thermal properties of shallot flour as a source of thickening agent. *Journal of Food Process Engineering*, 43(3), e13237.
- Kizil, R., Irudayaraj, J., & Seetharaman, K. (2002). Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(14), 3912–3918.
- Kooijman, H. A., & Taylor, R. (1991). Estimation of diffusion coefficients in multicomponent liquid systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 30(6), 1217–1222. <https://wpfiles.mines.edu/emg/JournalPapers/2021/spe-204010-pa.pdf>
- Krishna, R., & Wesselingh, J. A. (1997). *The Maxwell-Stefan Approach to Mass Transfer. Chemical Engineering Science*, 52(6), 861–911.

- Krishna, Y., Faizal, M., Saidur, R., Ng, K., & Aslfattahi, N. (2020). State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119541. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119541>
- Kumar, V., Chakraborty, P., Janghu, P., Umesh, M., Sarojini, S., Pasrija, R., Kaur, K., Lakkaboyana, S. K., Sugumar, V., Nandhagopal, M., & Sivalingam, A. M. (2023). Potential of banana based cellulose materials for advanced applications: A review on properties and technical challenges. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6, 100366. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100366>
- Kumari, S., Debbarma, R., Habibi, M., Haque, S., & Suprasana, P. (2025). Banana waste valorisation and the development of biodegradable biofilms. *Waste Management Bulletin*, 3(3), 100213. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100213>
- Lasolastech. (2024, October 8). *Understanding Dynamic Light Scattering Theory - Waters | Wyatt Technology*. Wyatt Technology.
- Li, S., Xing, D., & Li, J. (2004). Dynamic light scattering application to study protein interactions in electrolyte solutions. *Journal of Biological Physics*, 30(4), 313–324. <https://doi.org/10.1007/s10867-004-0997-z>
- Makroo, H., Naqash, S., Saxena, J., Sharma, S., Majid, D., & Dar, B. (2021). Recovery and characteristics of starches from unconventional sources and their potential applications: A review. *Applied Food Research*, 1(1), 100001. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100001>
- Makowska, A., Dwiecki, K., Kubiak, P., Baranowska, H. M., & Lewandowicz, G. (2022). Polymer-Solvent interactions in modified starches PASTes–Electrokinetic, dynamic light scattering, rheological and low field nuclear magnetic resonance approach. *Polymers*, 14(15), 2977. <https://doi.org/10.3390/polym14152977>
- Malgor. M; Viña, S & Dini, C (2019). *Recuperación de proteínas y compuestos fenólicos de raíces de Pachyrhizusahipa para enriquecer almidones libres de gluten*. CIDCA (Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos), Facultad Ciencias Exactas UNLP – CONICET La Plata - CICPBA, 47 y 116 S/Nº, <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/153588>
- Malgor, L. (2019). *Potencial zeta y estabilidad coloidal de almidones enriquecidos con proteínas*. Memorias: XXI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos; XVII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CYTAL-ALACCTA 2019) . [CYTAL2019-Libro-de-Resumenes.pdf](#)
- Martínez, P., Sarmiento, K. & Suárez, M. (2019). Propiedades fisicoquímicas, funcionales y

- estructurales de almidones nativos y acetilados obtenidos a partir de la papa (*Solanum tuberosum*) var. 'única'. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(3), 338-351. [SciELO Perú+1](#)
- McClements, D. J. (2016). *Food emulsions: principles, practices, and techniques* (3rd ed.). CRC Press.
- Mettler-Toledo International Inc. all rights reserved. (2025, August 29). *Solución tampón de pH para laboratorio*. Mettler-Toledo International Inc. All Rights Reserved. https://www.mt.com/es/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH-meter/pH-buffer-standard-and-electrolyte/pH-buffer.html
- Mine, Y. (1996). Laser light scattering study on the Heat-Induced ovalbumin aggregates related to its gelling property. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(8), 2086–2090. <https://doi.org/10.1021/jf960153z>
- Moorthy, S.N. (2002) Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: A review. *Starch- St ärke*, 54, 559-592. [http://dx.doi.org/10.1002/1521-379X\(200212\)54:12](http://dx.doi.org/10.1002/1521-379X(200212)54:12)
- Murphy, R. J., Pristinski, D., Migler, K., Douglas, J. F., & Prabhu, V. M. (2010). Dynamic light scattering investigations of nanoparticle aggregation following a light-induced pH jump. *The Journal of Chemical Physics*, 132(19), 194903. <https://doi.org/10.1063/1.3425883>
- Munhoz, M. P., F. H. Weber, and Y. K. Chang. 2004. Influencia de hidrocoloides na texture de gel de amido de milho. *Ciën. Tecnol. Altment, Campinas* 24(3): 403-406.
- Norton, R., Angel, M., Arguello, R., Balcázar, A., Martínez, H., Samacá, H., & Turner, A. (2017). *The Competitiveness of Tropical Agriculture A Guide to Competitive Potential with Case Studies*. Elsevier.
- Ortega A & Elizabeth J (2016, April 1). Estudio de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la harina de banano (*Musa acuminata* AAA) de rechazo en el desarrollo de películas biodegradables. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/22874>
- Oliveira, D.C. et al. (2020). Evaluation of cassava starch as raw ... *Research, Society and Development*, 9(12), e8491210879. rsdjournal.org
- Oliveira, L., Cordeiro, N., Evtuguin, D., Torres, I., & Silvestre, A. (2007). Chemical composition of different morphological parts from 'Dwarf Cavendish' banana plant and their potential as a non-wood renewable source of natural products. *Industrial Crops and Products*, 26(2), 163-172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.002>
- Perez, L. (n.d.). *ALMIDONES DE SUCRE, CIERRA 2021 CON CIFRAS HISTÓRICAS EN PRODUCCIÓN*.

<https://almidonesdesucre.com.co/noticias/58-almidones-de-sucre-cierra-2021-con-cifras-historicas-en-produccion>

Peters Jr., T. (1995) All about Albumin: Biochemistry, Genetics, and Medical Applications. Academic Press, Cambridge.

<https://doi.org/10.1016/B978-012552110-9/50006-4>

Puri, A. (2025). Starch Science Advancement: Isolation Techniques ... *MDPI*, 5(3), 40. [MDPI](#)

Pesek, S., & Silaghi-Dumitrescu, R. (2024). The Iodine/Iodide/Starch supramolecular complex. *Molecules*, 29(3), 641. <https://doi.org/10.3390/molecules29030641>

Rajan, R., Ahmed, S., Sharma, N., Kumar, N., Debas, A., & Matsumura, K. (2021). Review of the current state of protein aggregation inhibition from a materials chemistry perspective: special focus on polymeric materials. *Materials Advances*, 2(4), 1139–1176. <https://doi.org/10.1039/d0ma00760a>

Ramu, R. & Shirahatti, P. & Anilakumar, K. & Nayakavadi, Sh. & Zameer, F. & Bhadrappura L., Dhananjaya & Prasad M N, Nagendra. (2017). Assessment of Nutritional Quality and Global Antioxidant Response of Banana (Musa sp. CV. Nanjangud Rasa Bale)

Gómez, C., Quesada, M. R., Astúa, S. V., Zamora, J. P. M., Lopretti, M., & Vega-Baudrit, J. R. (2020). Biorefinery of biomass of Agro-Industrial banana waste to obtain High-Value biopolymers. *Molecules*, 25(17), 3829. <https://doi.org/10.3390/molecules25173829>

Rivas-González, M., Méndez-Montealvo, M. G. C., Sánchez-Rivera, M. M., Núñez-Santiago, M. C., & A, B. P. L. (2008). *Caracterización morfológica, molecular y fisicoquímica del almidón de plátano oxidado y linternizado*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000500001

Rodriguez-Loya, J., Lerma, M., & Gardea-Torresdey, J. L. (2023). Dynamic light scattering and its application to control nanoparticle aggregation in colloidal Systems: a review. *Micromachines*, 15(1), 24. <https://doi.org/10.3390/mi15010024>

Rodriguez, C. C. M., & Zapata de Vivanco, M. A. (2020). Optimización para obtención de micropartículas recubiertas con proteínas del suero de la leche y evaluación de la solubilidad de la proteína adsorbida mediante ensayo gastrointestinal in vitro (Tesis de licenciatura). Facultad de Industrias Alimentarias, Escuela de Formación Profesional de Bromatología y Nutrición Humana, Iquitos, Perú. [content](#)

Rubinstein, M., & Colby, R. H. (2003). *Polymer Physics*. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198520597.001.0001>

- Suri, R. P. B., & Rafael, R. V. (2023). *Propiedades físicas, químicas y tecnofuncionales de almidones de papa (Solanum tuberosum) modificados por esterificación*. <https://repositorio.unajma.edu.pe/handle/20.500.14168/830>
- SeoSimple, & SeoSimple. (2024). Almidones naturales: industria farmacéutica, alimentaria y más. Pochteca Guatemala | Venta de materias primas para la Industria. <https://guatemala.pochteca.net/industria-farmaceutica-almidones-naturales/>
- Sindt, J., Montgomery, S. P., Farran, T., & Drouillard, J. S. (2010). *Refractive index: a rapid method for determination of starch availability in grains*. (PDF) [Refractive index: a rapid method for determination of starch availability in grains](#)
- Sitthiya, K., Devkota, L., Sadiq, M.B. Y Anal, A.K. (2018) Extraction and characterization of proteins from banana (*Musa Sapientum* L) flower and evaluation of antimicrobial activities. *Journal of food science and technology*, 2018, vol. 55, no. 2, p. 658- 666.
- Stetefeld, J., McKenna, S. A., & Patel, T. R. (2016). Dynamic light scattering: a practical guide and applications in biomedical sciences. *Biophysical Reviews*, 8(4), 409–427. <https://doi.org/10.1007/s12551-016-0218-6>
- Subroto, E., Mahani, M., Indarto, R., Yarlina, V. P., & Izzati, A. N. (2022). A mini review of physicochemical properties of starch and flour by using hydrothermal treatment. *Polymers*, 14(24), 5447. <https://doi.org/10.3390/polym14245447>
- Torres, Patricia; Pérez, Andrea; Marmolejo, Luis F.; Ordóñez, José A. & García, Reniel E. (2010) *UNA MIRADA A LA AGROINDUSTRIA DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA, DESDE LA ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS* Revista EIA, núm. 14, diciembre, 2010, pp. 23-38 Escuela de Ingeniería de Antioquia
- Tchiakam, S. B., Berger, S. L., Southall, J., Walden, H., & Gabrielsen, M. (2025). Stabilising proteins in solution using affordable and readily available small molecules. *Biophysical Reviews*. <https://doi.org/10.1007/s12551-025-01341-7>
- Tadros, T. (2013). *Colloid stability and the role of surface forces*. Wiley-VCH. DOI:10.1002/9783527631070
- Verónica, P., Alejandra, C., Sergio, M., Omar, P., & Arturo, G. (2021). Bioquímica y vías metabólicas de polisacáridos, lípidos y proteínas. *Abanico Veterinario*, 11. <https://doi.org/10.21929/abavet2021.47>
- Wang, S., Yu, J., & Yu, J. (2011). Structure and thermalproperties of oxidized maize starch with different carbonyl levels. *Food Chemistry*, 126(2), 397–403.

- Wongsagonsup, R., Shobsngob, S., Oonkhanond, B., & Varavinit, S. (2004). Zeta potential (?) and pasting properties of phosphorylated or crosslinked rice starches. *Starch - Stärke*, 57(1), 32–37. <https://doi.org/10.1002/star.200400311>
- Zhou, X., Zhang, Z., & Qiu, C. (2021). Investigation on the structural characteristics of starch using FTIR and Raman spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117117.
- Zhou, X., Cheng, R., Wang, B., Zeng, J., Xu, J., Li, J., Kang, L., Cheng, Z., Gao, W., & Chen, K. (2020). Biodegradable sandwich-architected films derived from pea starch and polylactic acid with enhanced shelf-life for fruit preservation. *Carbohydrate Polymers*, 251, 117117. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117117>
- Zhang, J., Liu, Y., Wang, P., Zhao, Y., Zhu, Y., & Xiao, X. (2025). The effect of Protein–Starch interaction on the structure and properties of starch, and its application in flour products. *Foods*, 14(5), 778. <https://doi.org/10.3390/foods14050778>
- Zimm, B. H. (1956). Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow birefringence and dielectric loss. *The Journal of Chemical Physics*, 24(2), 269–278. <https://doi.org/10.1063/1.1742462>