

Área de Conocimiento de Agricultura

OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN A ESCALA LABORATORIO EN LOS PROCESOS DE HIDRÓLISIS ÁCIDA Y FOSFATACIÓN PARA LA MODIFICACIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Químico

Elaborado por:

Br. DIANA
MARGARITA
FIALLOS
SARAVIA
2019-0004E

Br. VANESSA
ALEXANDRA
ROSALES
MENDOZA
2019-0890U

Tutor:

Dr. DANILO
LÓPEZ VALERIO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser nuestra guía y fuente de fortaleza a lo largo de este proceso. Por iluminar nuestro camino y darnos las fuerzas necesarias para superar cada desafío.

Al Dr. Danilo López y al profesor Osmar Flores por su apoyo y orientación durante el desarrollo de este trabajo. Su dedicación y experiencia han sido fundamentales para la culminación de esta investigación.

Al personal de laboratorio, administrativo y docente, por su colaboración constante y por facilitarnos el acceso a los recursos necesarios para llevar a cabo esta tesis. En especial, agradecemos al ingeniero Sergio Salazar por su disposición ante nuestras constantes interrogantes; a la licenciada Danelis Barrios por sus palabras de aliento, consejos y apoyo; y a los Ingenieros Arnoldo Hidalgo, Joseph Pantoja y Anjeensond Villegas, quienes nos facilitaron en la medida de lo posible los recursos necesarios para el desarrollo de este trabajo e hicieron ameno nuestro tiempo durante nuestras horas de trabajo, su disposición y ayuda fueron esenciales para el buen desarrollo de esta investigación.

A la empresa ALCASA por brindarnos el apoyo y la confianza para hacer uso de sus instalaciones. Sobre todo, a la ingeniera Celeste García y al licenciado José Salazar, por ser las personas que estuvieron pendientes y nos acogieron dentro de la empresa. Gracias por su guía, apoyo y disposición ante nuestras inquietudes.

A todos aquellos que, de alguna manera, contribuyeron a la culminación de esta etapa, nuestro más sincero agradecimiento.

A Dios, por darme la fortaleza y la dedicación necesaria a lo largo de todo mi recorrido universitario. Su amor y protección estuvieron siempre presentes, especialmente en los momentos en que me encontraba lejos del calor de mi hogar, de mis padres y de mi familia.

A mis padres, por su inmenso esfuerzo y por brindarnos, a mis hermanos y a mí, los medios para cumplir nuestros sueños. Les agradezco la confianza que siempre han depositado en mí, apoyándome en mis decisiones, incluso cuando estas me han llevado a estar a kilómetros de distancia.

A mis docentes a lo largo de la carrera, quienes despertaron e impulsaron mi entusiasmo por la ingeniería química gracias a su entrega y pasión por la enseñanza. En especial, agradezco al ingeniero Fong, quien sentó las bases de mis estudios universitarios, y a las ingenieras María Reyes, María Esther Baltodano y Luz Violeta Molina, por su compromiso con la educación. Cualquier asignatura impartida por ellas se convirtió en una de mis favoritas.

Al Dr. Danilo López, por su confianza en mí como estudiante, persona e investigadora, y por su acompañamiento y apoyo durante esta etapa final. También agradezco al profesor Osmar Flores, su gran amigo, por su disposición y por brindarme orientación en cada interrogante durante este proceso investigativo.

A Vanessa, quien más allá de ser una compañera de equipo excepcional, se ha convertido en una amiga invaluable. Gracias por estar siempre a mi lado, por escucharme, aconsejarme y apoyarme. Somos la dupla casi perfecta, y valoro profundamente cada conversación y experiencia que compartimos tanto dentro como fuera de la universidad. A ella y a todos aquellos que me acogieron con su amistad haciendo más llevadera mi vida universitaria, muchas gracias.

A Bis, por hacer de mi último año de carrera uno de los mejores. Gracias por hacerme sentir amada y protegida estando lejos de casa. Sos un rayo de luz en mi vida.

A la ingeniera Jeanette Barrera, por acogerme en su hogar durante cinco años y hacerme sentir parte de su familia. Agradezco profundamente su disposición y cariño.

Finalmente, quiero agradecerme por el esfuerzo y la dedicación que he puesto en cada paso de este recorrido. A pesar de los momentos difíciles y de incertidumbre, nunca consideré rendirme. He enfrentado cada reto con resiliencia, superando las adversidades que se presentaron a lo largo del camino. Este logro es el resultado de mi perseverancia, y me enorgullezco del crecimiento personal que he alcanzado en esta etapa.

Diana M. Fiallos Saravia

Primeramente, agradezco a Dios por concederme salud, sabiduría y fortaleza para completar esta etapa de mi vida. Gracias por guiarme y asistirme en cada una de mis decisiones a lo largo de este tiempo, por permitirme vivir experiencias tanto buenas como difíciles que hoy guardo en mi mente y corazón.

A mis padres y hermanos, por todo el sacrificio y esfuerzo realizados durante estos seis años. Su amor, apoyo incondicional y respeto por mis decisiones fueron un pilar fundamental para poder cumplir esta meta.

A mis hermanos de comunidad por escucharme en mis mejores y peores momentos de este proceso, sé que siempre estuve en sus oraciones, sus consejos y apoyo los llevo como un sello en mi corazón.

A mi increíble amiga y compañera de tesis, Diana, por regalarme su amistad y confiar en mí durante estos años tanto como colega de trabajo y amiga. Por escucharme, aconsejarme y apoyarme en todo. Por ayudarme a vencer mis miedos e inseguridades, inculcarme buenos hábitos y fortalecer la confianza en mí misma y en mis capacidades, por todo eso y cada una de las experiencias vividas dentro y fuera de la universidad, simplemente puedo decirle gracias.

A mis demás compañeros y amigos de la universidad, Josué Rocha, Arvell Villares y Luis Torres, por su cercanía, apoyo y amistad todo este tiempo. Me quedo con cada una de las experiencias y lecciones que nos dejaron los trabajos en equipo, donde nunca faltaron las risas, los desacuerdos, el estrés, los desvelos y la desesperación, pero que al final del día celebrábamos nuestros logros.

A mis docentes, por todo lo que me han brindado, no solo en términos de conocimiento, sino también en valores, ética y humanidad. Un agradecimiento especial a los Ingenieros Néstor Fong, María Reyes, María Esther Baltodano y Luz Violeta Molina. Gracias por cultivarnos en cada clase el amor por el aprendizaje y por la carrera, inspirándonos a ser mejores cada día, desafiándonos más allá de lo esperado.

A mis mejores amigos desde la infancia, Carlos Sequeira y Josseling Galo, gracias por apoyarme todos estos años. Su invaluable amistad, su constante inspiración para ser una mejor persona, y su capacidad para mantenerme con los pies sobre la tierra me han enseñado a ponerle amor y pasión a todo lo que hago, sin temerle al fracaso.

Finalmente, quiero agradecerme a mí misma por creer y confiar en que este momento llegaría. Agradezco todo el esfuerzo y empeño que puse en este trabajo, por sacrificar mis días libres y el tiempo con mi familia a lo largo de estos seis años, sin renunciar al proceso. Me agradezco por no dejar de ser yo misma, por todas aquellas noches en las que mi estado de ánimo no era el mejor y el cansancio por el desvelo me superaba. Sé que todo eso valió y valdrá la pena, porque estoy convencida de que Dios no deja ningún sacrificio sin recompensa.

Vanessa A. Rosales Mendoza

DEDICATORIA

Este trabajo no podría estar dedicado a nadie más que a mis padres, Abelardo Fiallos y Diana Saravia, quienes con su dedicación y esfuerzo diario me han brindado las mejores oportunidades para enfrentar el camino de la vida. ¡Gracias, papi y mami! Me han dejado la herencia más valiosa que podrían haberme dado.

Quiero también dedicar este logro de manera muy especial a mi Papi Trino, mi querido abuelito, quien me enseñó constantemente la importancia de estudiar y prepararme. Me hubiese encantado que estuviera aquí para presenciar el cierre de esta etapa. Un abrazo hasta el cielo, papito.

Diana M. Fiallos Saravia

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, mi fortaleza y mi guía durante toda esta etapa universitaria, por iluminar mi camino y concederme este logro. A la Santísima Virgen María, mi intercesora, por su maternal protección.

A mis padres, Reyna Isabel Mendoza Osorio y Danilo José Rosales quienes con su amor incondicional me han apoyado durante todo este tiempo y me han impulsado a alcanzar mis metas con esfuerzo y perseverancia.

A mis hermanos y demás familiares por apoyarme siempre y animarme en los momentos difíciles. A mis hermanos en la fe, por sus oraciones y constante aliento. A mis amigos, por su valiosa amistad, comprensión y compañía en cada paso.

Y finalmente, a mí misma, por la determinación, sacrificio y empeño con los que enfrenté y superé cada desafío en este camino.

Vanessa A. Rosales Mendoza

RESUMEN

En este estudio se prepararon almidones modificados a partir de almidón de yuca nativo, utilizando dos métodos de modificación química, hidrólisis ácida y fosfatación. Se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas y funcionales, y con ayuda del software Minitab V14 mediante método gráfico, se optimizaron los parámetros de reacción para cada método, siendo estos, concentración de ácido, agente fosfatante y tiempo de reacción. A través de la evaluación de distintas condiciones experimentales, se evidenció una modificación significativa en las propiedades de viscosidad, temperatura de gelatinización, índice de solubilidad en agua, índice de absorción de agua e índice de acidez para cada uno de los tratamientos químicos aplicados. Las condiciones óptimas determinadas por el software fueron 0.5 N de HCl y 1h para la hidrólisis ácida y 0.1% (p/p) de tripolifosfato de Sodio y 1h para la fosfatación, representando una solución eficiente y rentable en términos de reactivos y tiempo de procesamiento.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS	2
	2.1 Objetivo general.....	2
	2.2 Objetivos específicos	2
III.	MARCO TEÓRICO.....	3
	3.1 Almidón	3
	3.2 Yuca.....	3
	3.2.1 Generalidades	3
	3.2.2 Composición fisicoquímica de la yuca	4
	3.3 Almidón de yuca.....	4
	3.3.1 Composición y estructura química del almidón de yuca	4
	3.3.2 Propiedades fisicoquímicas del almidón	6
	3.3.3 Propiedades funcionales del almidón	8
	3.4 Almidones modificados	9
	3.4.1 Importancia y uso de los almidones nativos vs. almidones modificados .	9
	3.4.2 Modificación química	11
	3.5 Diseño experimental.....	14
	3.5.1 Diseño experimental de Taguchi	14
IV.	METODOLOGÍA.....	15
	4.1 Material	15
	4.1.1 Materia Prima	15
	4.1.2 Materiales y Equipos de laboratorio.....	16
	4.2 Métodos	17
	4.2.1 Caracterización de almidón nativo y modificados	17
	4.2.2 Modificación del almidón nativo de yuca mediante hidrólisis ácida	21
	4.2.3 Modificación del almidón nativo de yuca por fosfatación con Tripolifosfato de Sodio (TPS).....	21
	4.3 Diseño experimental.....	23
	4.4 Variable respuesta	24
V.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	26
	5.1 Propiedades fisicoquímicas del almidón industrial de yuca nativo	26
	5.2 Parámetros de operación de la hidrólisis ácida y fosfatación para modificación de almidones.	28
	5.2.1 Hidrólisis ácida.....	28

5.2.2 Fosfatación	31
5.3 Características fisicoquímicas y funcionales del almidón nativo de yuca y almidón modificado de yuca ante procesos de hidrólisis acida y fosfatación.....	35
VI. CONCLUSIONES	42
VII. RECOMENDACIONES	43
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	44
IX. ANEXOS	52

Índice de tablas

Tabla 1: Composición química de la yuca (<i>Manihot esculentum</i>)	4
Tabla 2: Propiedades de los componentes de almidón	6
Tabla 3: Características de los gránulos de almidón	7
Tabla 4: Materiales y equipos para la caracterización del almidón nativo y modificado	16
Tabla 5: Factores y niveles del diseño experimental	23
Tabla 6: Tratamientos para la modificación del almidón de yuca por hidrólisis ácida.....	23
Tabla 7: Tratamientos para la modificación de almidón de yuca por fosfatación.....	24
Tabla 8: Códigos de tratamientos para registro de datos experimentales	24
Tabla 9: Propiedades fisicoquímicas del almidón nativo de yuca	26
Tabla 10: Valores promedios obtenidos para las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón nativo y modificados por medio de Hidrólisis ácida y Fosfatación.....	35

I. INTRODUCCIÓN

El almidón es un componente funcional crucial en muchos sistemas alimenticios; siendo la principal fuente de energía en la dieta. Además, contribuye a la estructura, textura, consistencia y apariencia de los productos en los cuales se incorpora (Rogols, 1986). En la industria, el almidón se utiliza, ya sea en su forma nativa como modificada. Sin embargo, a pesar de sus numerosas propiedades funcionales, por muchos años los almidones nativos han sido utilizados de manera limitada en la industria de alimentos debido a las características que estos desarrollan una vez cocidos (Wurzburg, 1986; Light, 1990). El almidón de yuca, en particular, ha sido objeto de numerosos estudios debido a su abundancia, bajo costo y buenas propiedades funcionales (Aristizábal & Sánchez, 2007; Jiménez & Martínez, 2016; Atichokudomchai et al., 2000; Schmitz, y otros, 2006).

Para superar las limitaciones que presenta el uso de almidones nativos en la elaboración de productos alimenticios; se han desarrollado una serie de técnicas químicas para su modificación, a fin de obtener derivados que presenten las características y propiedades funcionales requeridas para procesos específicos, las cuales no se pueden lograr cuando se utilizan almidones nativos (Wurzburg, 1986).

Las técnicas de modificación química por derivatización (o sustitución) y conversión (o degradación) son ampliamente utilizadas en la industria de alimentos debido a que proporcionan gran estabilidad y satisfacen necesidades específicas para una gran variedad de sistemas alimenticios. Dentro de esta última se encuentra la hidrólisis ácida, la cual rompe los enlaces glicosídicos de las cadenas de amilosa y amilopectina del almidón, provocando una reducción a moléculas más pequeñas (Hoover, 2001; Wang & Copeland, 2006). Por su parte, los almidones fosfatados se obtienen a través de la esterificación de los grupos hidroxilos con agentes fosfatantes con el objetivo de disminuir la retrogradación del mismo (Rutenberg & Solarek, 1994).

En este contexto, esta investigación buscó evaluar las diferentes condiciones de reacción, para los métodos mencionados con anterioridad, y como afectan las propiedades del almidón: viscosidad, temperatura de gelatinización, índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA) e índice de acidez. De modo que, para obtener almidones de yuca modificados con propiedades deseables, por medio de dichos métodos, se optimizaron los parámetros de operación de las reacciones, esto, con el objetivo de maximizar la eficiencia de las mismas, mejorar la calidad de los productos finales y reducir costos de producción. Estos parámetros fueron, concentración de ácido, agente fosfatante y tiempo de reacción.

Este estudio busca contribuir al conocimiento científico, proporcionando información relevante para procesos industriales de modificación de almidones. Actualmente, el almidón de yuca tiene una gran demanda en la industria alimentaria por su estabilidad y características, las cuales pueden mejorarse aún más mediante técnicas de modificación como la hidrólisis ácida y la fosfatación, empleadas en este estudio para caracterizar sus propiedades fisicoquímicas y explorar sus posibles aplicaciones.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Optimizar los parámetros de control de la reacción de hidrólisis ácida y fosfatación para la obtención de almidón modificado de yuca.

2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del almidón industrial de yuca nativo mediante técnicas de laboratorio.
2. Establecer los diferentes parámetros de operación de la hidrólisis ácida y el proceso de fosfatación para la obtención de almidón modificado.
3. Comparar las características fisicoquímicas del almidón nativo de yuca con los almidones modificados obtenidos mediante los procesos de hidrólisis ácida y fosfatación.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Almidón

El almidón es un carbohidrato de reserva presente en grandes cantidades en raíces y tubérculos, cereales, semillas y leguminosas, bajo la forma de gránulos parcialmente cristalinos, cuya forma y tamaño varían según el origen botánico (Cheftel et al., 1980). En los órganos de las plantas, el almidón se acumula en forma de gránulos relativamente compactos, insolubles en agua fría y con un tamaño que oscila entre 1 y 100 micrómetros (Liu Q. , 2005).

La composición química y morfológica de estos gránulos está sujeta a las características específicas de la especie vegetal correspondiente. La variación morfológica y la composición química de los gránulos de almidón son aspectos que inciden en las propiedades funcionales de los mismos, así como en su susceptibilidad al ataque enzimático (Belitz & Grosch, 2012).

En los cereales se encuentra principalmente en productos como el maíz, el trigo y el arroz, a concentraciones que oscilan entre 30 a 80%; en las semillas de algunos frijoles, chícharos o habas se encuentra entre 25 a 50%, y en las raíces y tubérculos, tales como yuca, papa, batata y ñame, el almidón representa entre un 60 a 90% del peso seco (García et al., 1997).

3.2 Yuca

3.2.1 Generalidades

La yuca es un cultivo importante en varios países de América Latina, África y Asia. Es una planta perenne que puede crecer hasta cuatro metros de altura y se cultiva por sus raíces tuberosas comestibles. Dichos tubérculos pueden alcanzar los cuatro o cinco metros de largo y diez centímetros de diámetro (Avellán, 2016).

Se destaca por su alta resistencia y capacidad para crecer en condiciones adversas, tales como sequías, suelos degradados y ciertos tipos de plagas y enfermedades. Esto la convierte en un cultivo muy versátil, ya que puede ser sembrada y cosechada en diferentes momentos y lugares, adaptándose a las necesidades y características de cada zona (Aristizábal & Sánchez, 2007).

En la región se pueden encontrar diversas variedades de yuca, introducidas por el INTA en Nicaragua para aumentar su producción. Entre las variedades más comunes se encuentran la Inta amarilla, Inta reyna, Inta tololar, blanca criolla, ceiba, valencia y Perú, las cuales se dividen en yucas dulces y yucas amargas. Las yucas dulces son las más utilizadas para consumo humano, mientras que las amargas se destinan principalmente a uso industrial debido a su mayor contenido de almidón. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta clasificación no siempre es exacta, ya que depende de las condiciones edafoclimáticas. De hecho, estudios han demostrado que el sabor amargo puede incrementarse en suelos fértiles, lo que significa que una

variedad de yuca puede ser clasificada como amarga en una localidad y dulce en otra. (Avellán, 2016)

3.2.2 Composición fisicoquímica de la yuca

En términos de composición fisicoquímica, el tubérculo de yuca es una fuente rica en carbohidratos y contiene una variedad de otros nutrientes esenciales. La yuca es en realidad una excelente fuente dietética de energía, a pesar que las raíces tienen entre 30% y 40% de materia seca, esto depende de factores como la variedad, edad de las raíces, suelo, clima y sanidad de la planta (Cock, 1989).

Los carbohidratos son el principal componente de la yuca. El almidón es el tipo predominante de carbohidrato presente en la yuca, representando aproximadamente el 18-36% de su contenido total de carbohidratos dependiendo de qué tan oportuna es su cosecha y producción, además de su variedad (Pinto, 1980).

Además de carbohidratos, la yuca también contiene proteínas, en cantidades moderadamente bajas. En cuanto a grasas, la yuca posee menos del 1% de contenido graso. De igual forma, contiene una variedad de vitaminas y minerales. En la tabla 1 se detallan los porcentajes correspondientes a las propiedades químicas y físicas del tubérculo de yuca.

Tabla 1: Composición química de la yuca (*Manihot esculentum*)

Componentes	Raíz	Harina
Energía	162 kcal/kg	335 kcal/kg
Humedad	58.9%	14.3 %
Carbohidratos	39.3%	80.9%
Proteínas	0.8%	1.7%
Grasa	0.2%	0.5%
Fibra	1.1%	1.8%
Ceniza	0.8%	2.6%
Calcio	25mg	155 mg
Hierro	0.5mg	5.3 mg
Fósforo	52mg	110 mg
Vitamina A	1.0 mg	0 mg
Tiamina	0.04 mg	0.08 mg
Riboflavina	0.04 mg	0.07 mg
Niacina	0.76 mg	1.60 mg

Fuente: Adaptada de Ospina & Ceballos (2002)

3.3 Almidón de yuca

3.3.1 Composición y estructura química del almidón de yuca

El almidón de yuca es un carbohidrato complejo que se encuentra en la raíz de la planta de yuca. Está compuesto principalmente de 98-99% por dos tipos de moléculas de glucosa: amilosa y amilopectina (Rojas, 2012). El restante es un material intermedio

que depende del origen botánico e igualmente de la tecnología de extracción, constituido entre otros por lípidos.

La amilosa es una molécula lineal formada por unidades de glucosa unidas por enlaces α -D-(1-4), los cuales constituyen un 99% de la molécula (Jiménez & Martínez, 2016). La estructura de este polisacárido permite que las moléculas se alineen en una forma helicoidal (Figura 1), lo que le confiere propiedades de solubilidad limitada en agua y una mayor capacidad para formar geles. La amilosa forma muchos complejos insolubles con un gran número de moléculas orgánicas como alcoholes alifáticos, ácidos monoglicéridos o ácidos grasos lineales; el complejo generalmente precipita cristalizándose lo que permite hacer la separación con la amilopectina (Aristizábal & Sánchez, 2007).

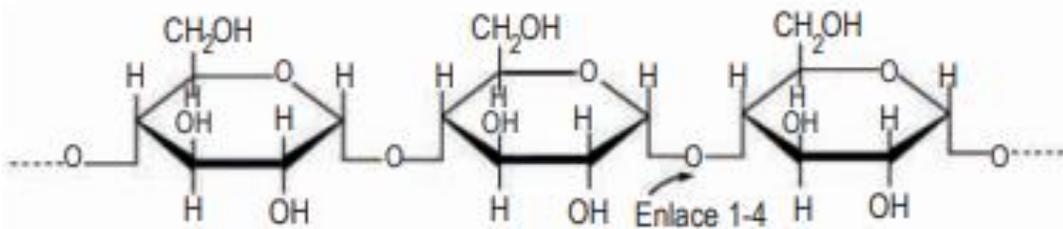


Figura 1: Estructura química del polímero de amilosa. (Aristizábal & Sánchez, 2007)

Por otro lado, la amilopectina es un polímero ramificado de D-glucosa unidas por enlaces α -1,4, pero con enlaces α -1,6 adicionales que forman ramificaciones (Figura 2). El gran tamaño y naturaleza ramificada de la amilopectina reduce la movilidad de los polímeros e interfiere su tendencia a orientarse muy estrechamente para permitir niveles significantes de enlaces de hidrógeno. (Aristizábal & Sánchez, 2007).

Rojas (2012) manifiesta que, durante la cocción, la amilopectina absorbe mucha agua y que es en gran parte la responsable del hinchamiento de los gránulos de almidón. Las soluciones de amilopectina muestran muy débil retrogradación y por lo tanto poseen un elevado poder de retención de agua después del enfriamiento, contrario a las de amilosa.

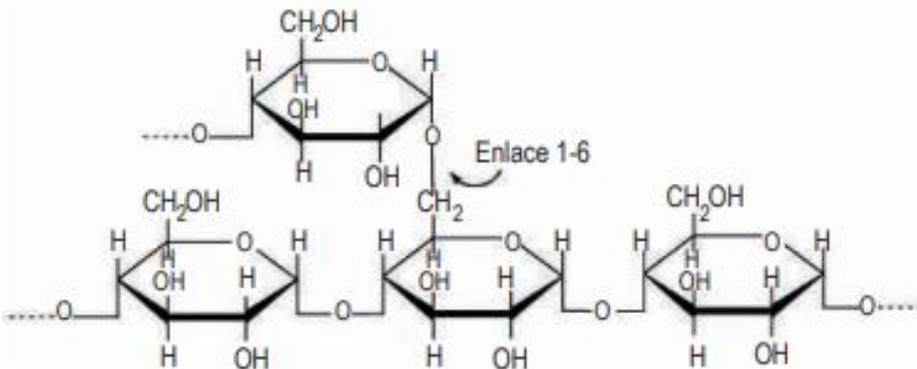


Figura 2: Estructura química del polímero de amilopectina (Aristizábal & Sánchez, 2007)

La proporción relativa de amilosa y amilopectina en el almidón de yuca puede variar según la variedad de yuca y las condiciones de cultivo. Las diferencias en la proporción de estos dos polisacáridos pueden afectar las propiedades funcionales y físicas del almidón de yuca, como su capacidad de gelificación, espesamiento y estabilidad. El almidón de yuca tiene entre 17-22 por ciento de amilosa. La estructura y la cantidad relativa de ambos componentes del almidón juegan un papel importante en la determinación de las propiedades fisicoquímicas del almidón (Tabla 2).

Tabla 2: *Propiedades de los componentes de almidón*

Propiedad	Amilosa	Amilopectina
Estructura	Lineal	Ramificada
Longitud promedio de la cadena (unidades de glucosa)	Aprox. 1 000	20-25
Peso molecular (Da)	40 000 hasta 10 ⁶	200 000 hasta 10 ⁹
Grado de polimerización	Aprox. 1 000	10 000-100 000
En solución	Hélice extendida o enrollada	Esfera irregular
Estabilidad en soluciones acuosas	Retrograda	Estable
Acomplejamiento	Con facilidad	Con dificultad
Gel	Firme e irreversible	Suave y reversible
Formación	Favorable	Desfavorable
Longitud de onda máxima de absorción (nm)	Aprox. 660	530-550

Fuente: Adaptado de Aristizábal & Sánchez (2007)

3.3.2 Propiedades fisicoquímicas del almidón

3.3.2.1 Morfología y tamaño del granulo

Los almidones de ñame, así como los almidones de otras raíces y tubérculos, difieren en forma y tamaño según la especie botánica; el conocimiento de estas diferencias permite determinar su capacidad de absorción de agua y la susceptibilidad del gránulo frente a la acción de ciertos agentes físicos, químicos y enzimáticos. Además, la forma del gránulo se utiliza como indicador del origen del almidón y puede ser utilizado como parámetro de calidad para identificar almidones adulterados (Niba et al., 2002).

La morfología de gránulos de almidón de diferentes variedades de ñame, de yuca y de papa, haciendo uso de microscopía de luz polarizada, fue determinada por Farhat et al., (1999) Los resultados obtenidos determinaron la existencia de diferencias significativas en cuanto a la forma y tamaño de los diversos almidones en estudio, siendo los gránulos de tres variedades de ñame (*Dioscorea cayensis*, *D. rotundata* y *D. alata*) y los gránulos de papa, los de mayor tamaño; mientras que los gránulos de almidón de yuca y de *D. dumetorum* eran más pequeños que los anteriores.

La tabla 3 muestra una comparación de algunas de las propiedades fisicoquímicas más relevantes de varios almidones, entre ellos el almidón de yuca.

Tabla 3: Características de los gránulos de almidón

Almidón	Tipo	Morfología	Diámetro (µm)	Contenido de amilosa (%)	Temperatura de gelatinización (°C)	Temperatura de gelificación (°C)	Propiedades de cocción
Maíz	Cereal	Redondo poligonal	5-30	25	62-72	80	Gel opaco
Maíz ceroso	Cereal	Redondo poligonal	5-30	<1	63-72	74	Claro cohesivo
Yuca	Raíz	Ovalado truncado	4-35	17	62-73	63	Claro cohesiva tendencia a gelificar
Papa	Tubérculo	Ovalado esférico	5-100	20	59-68	64	Claro cohesiva tendencia a gelificar
Trigo	Cereal	Redondo lenticular	1-45	25	58-64	77	Gel opaco
Arroz	Cereal	Esférico poligonal	3-8	19	68-78	81	Gel opaco
Sago	Tronco	Ovalado truncado	15-65	26	69-74	74	Gel opaco

Fuente: Adaptado de Aristizábal & Sánchez (2007)

3.3.2.2 *Acidez titulable*

La acidez titulable es una medida de la cantidad de ácido presente en una muestra y se expresa en términos de concentración de ácido. Este valor es importante porque puede ser un indicador de la calidad, estabilidad de los almidones y del tiempo de almacenamiento promedio de un alimento. (Patiño & Toro, 2022).

3.3.3 *Propiedades funcionales del almidón*

3.3.3.1 *Viscosidad*

La viscosidad es una propiedad fundamental que describe la resistencia interna de los líquidos al fluir bajo la aplicación de una fuerza de corte. Representa la fricción entre las diferentes capas del líquido, lo que impide su flujo libre (Najarro, 2009). En el contexto de los almidones, la viscosidad desempeña un papel crucial en el procesamiento industrial, el control de calidad y el almacenamiento de una amplia variedad de alimentos.

La viscosidad de los almidones puede variar debido a varios factores, como el tipo de almidón, la composición de amilosa y amilopectina, la concentración de almidón y la temperatura a la que se encuentran (Aristizábal & Sánchez, 2007). Estos factores influyen en la capacidad de los almidones para formar mezclas más o menos espesas y viscosas cuando se mezclan con agua caliente.

Es importante destacar que la viscosidad de los almidones tiene implicaciones significativas en la calidad de los alimentos y en las propiedades sensoriales de los productos finales. Por ejemplo, en la industria alimentaria, el control de la viscosidad es crucial para lograr la textura adecuada en productos como salsas, aderezos, cremas y postres (Liu Q. , 2005). Una viscosidad óptima garantiza una consistencia deseada, una buena estabilidad de la emulsión y una capacidad de retención de agua adecuada en los productos alimentarios.

3.3.3.2 *Gelatinización, gelificación y retrogradación*

Durante los tratamientos hidrotérmicos, el almidón sufre una serie de modificaciones que van a influir en su estructura pasando por tres fases importantes: gelatinización, gelificación y retrogradación, estos, causan hinchamiento, hidratación, fusión y ruptura de los gránulos de almidón (Aristizábal & Sánchez, 2007).

La gelatinización del almidón, según Martínez (2007, págs. 17-18), es el colapso del orden molecular, manifestado por cambios irreversibles del gránulo de almidón en sus propiedades. Estos cambios se observan luego de que el gránulo, al contacto con el agua fría se hidrata; al aplicarle calor, el gránulo comienza a hincharse hasta que, a cierta temperatura, la estructura se altera y se da la formación de la pasta de almidón.

Por otro lado, la gelación consiste en un proceso de reagrupación de la amilosa y amilopectina liberadas en la etapa anterior. Aquí se incrementa la rigidez dentro de los gránulos hinchados formando una especie de red, así lo menciona Biliaderis (1991), y

también indica que la amilosa gelifica usualmente fuera del gránulo rápidamente después de la gelatinización, sin embargo, la amilopectina permanece en el gránulo hinchado donde lentamente cristaliza.

Finalmente, la retrogradación, es el proceso colectivo de pérdida de solubilidad del almidón disuelto (Martínez, 2007), esto sucede al enfriar y dejar en reposo la pasta formada en la etapa de gelatinización volviéndola menos soluble. El grado de retrogradación es afectado por la concentración de amilosa y amilopectina, tamaño molecular, temperatura, pH y los componentes diferentes al almidón en el medio (Aristizábal & Sánchez, 2007)

3.3.3.3 Índice absorción de agua e índice de solubilidad en agua

El índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA) son dos propiedades importantes que se utilizan para caracterizar los almidones y comprender su comportamiento en diferentes aplicaciones. El primero se refiere a la capacidad de un almidón para absorber agua. Es una medida de la cantidad de agua que puede ser absorbida por una determinada cantidad de almidón en condiciones específicas (López, 2013) y se vuelve una propiedad relevante en diferentes aplicaciones, como la producción de alimentos horneados, alimentos procesados y productos de confitería entre otros, así lo indica Torres (2015), además menciona que un alto valor de IAA puede ser beneficioso para mejorar la textura, la jugosidad y la vida útil de los productos alimentarios.

Por otro lado, el índice de solubilidad en agua hace referencia a la capacidad de un almidón para disolverse en agua en determinadas condiciones. Esta propiedad es importante en aplicaciones como la producción de alimentos instantáneos, sopas, salsas y bebidas en polvo (Torres, 2015). Un alto valor de ISA puede contribuir a una mejor dispersión y estabilidad en productos que requieren una rápida rehidratación.

3.4 Almidones modificados

3.4.1 Importancia y uso de los almidones nativos vs. almidones modificados

En la industria de alimentos el almidón ha sido ampliamente utilizado para controlar la consistencia y la estabilidad, para enlazar, expandir, densificar, aclarar y opacar, atraer o inhibir el contenido de humedad, para otorgar diferentes texturas y para la estabilización de emulsiones, entre muchas otras funciones (Howling, 1980; Rutenberg & Solarek, 1994; Coultate, 1998; Seymour & Carraher, 1996; Eke-Ejiofor, 2015).

No obstante, los almidones nativos exhiben ciertas desventajas al ser aplicados a nivel industrial, limitadas por sus propiedades funcionales, ya que a pesar de que se hidratan e hinchan rápidamente, éstos se rompen con facilidad disminuyendo su viscosidad, producen pastas muy fuertes y cohesivas, y son insolubles en agua fría (Bemiller, 1997; Amani et al., 2005; Hung y Morita, 2005; Singh et al., 2007; Shujun et al., 2008)

Además, Wurzburg (1986) y Schmitz et al., (2006) señalan que las características reológicas de algunas dispersiones de almidón nativo, como las provenientes de raíces y tubérculos, imparten una textura gomosa y cohesiva, en aquellos alimentos donde se utilizan como agentes espesantes.

Asimismo, Kaur et al., (2004) indica que algunos gránulos de almidón nativos muestran características peculiares, tales como baja resistencia al shock mecánico y térmico, descomposición térmica y retrogradación lenta, lo cual limita su uso en alimentos que requieren de una gran estabilidad durante el procesamiento y el almacenamiento.

Con el propósito de satisfacer ciertos requerimientos específicos en la industria de alimentos, se ha recurrido al uso de almidones modificados, los cuales según Badui, (1993), Hermansson & Svegmak, (1996); Ibañes et al., (2002), se pueden definir como cualquier producto derivado del almidón cuya preparación involucre la modificación de una o más propiedades del mismo, producto de la transformación de su estructura básica; mientras que Rogols, (1986) señala que la modificación de almidones nativos involucra un cambio en la forma física, una degradación controlada y/o la introducción de un grupo químico.

Los almidones pueden ser modificados por diferentes vías, bien sea físicas, químicas o biológicas; sin embargo, en la industria de alimentos los principales esquemas de modificación de almidones están fundamentados solo en los principios físicos y químicos (Boruch, 1985; Rogols, 1986; Wurzburg, 1986; Kim et al., 2007)

De manera general, el proceso de modificación de un almidón independientemente de la fuente botánica se muestra en la figura 3.

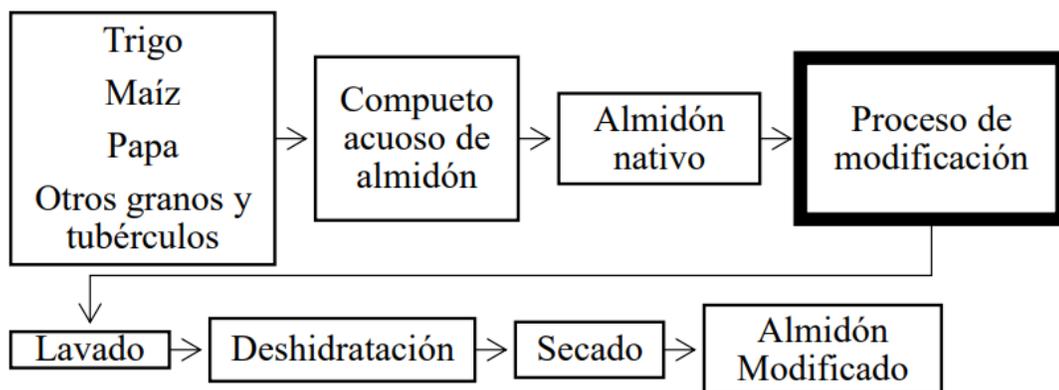


Figura 3: Proceso de obtención de almidón modificado. (Malin & Nilsson, 2018)

La mayoría de estas modificaciones han surgido con propósitos muy específicos, como por ejemplo: i) atribuir propiedades funcionales a los productos donde serán utilizados, que no son conferidas por los almidones nativos, tales como tolerar ciclos de congelación y descongelación, impartir diversos grados de viscosidad y ser resistentes a condiciones ácidas, entre otros; ii) los almidones modificados son abundantes y fácilmente disponibles; y iii) son más económicos que las gomas o

hidrocoloides (Moorthy, 2002; Kaur et al., 2004; Amani et al., 2005; Schmitz et al., 2006; Shujun et al., 2008).

Según Martínez K. T., (2007) los almidones modificados tanto solubles en caliente como pregelatinizados, son fundamentales en la producción de alimentos enlatados, sopas instantáneas, productos cárnicos, preparados de frutas, productos horneados, mezclas deshidratadas, etc., ya que estos proporcionan estabilidad, viscosidad controlada, mejora en la blancura, retención de agua, textura, brillo, claridad, estabilización de agua, prevención de la formación de grumos, entre otros beneficios.

Además, contribuyen a la calidad final de los alimentos horneados, manteniendo la frescura, retardando el enranciamiento y mejorando la textura de la miga. También se destaca que, la capacidad de este para ser adaptado en diferentes matrices alimentarias ha hecho posible su inclusión en productos dietéticos y funcionales, aportando beneficios digestivos y metabólicos, posicionándolo como un ingrediente clave en alimentos saludables (The Food Tech, 2023).

3.4.2 Modificación química

Las modificaciones químicas provocan cambios significativos en las propiedades funcionales del almidón, y generalmente se realizan en un medio acuoso, donde una suspensión de almidón, usualmente con un 30 a 40% de sólidos, se trata con el reactivo químico bajo condiciones apropiadas de agitación, temperatura y pH. Cuando la reacción se completa, el almidón se lleva al pH deseado con un agente neutralizante, se purifica por subsecuentes lavados con agua y se seca hasta obtener el almidón deshidratado (Vian, 1994; Thomas & Atwell, 1999; Kaur et al., 2004).

Belitz & Grosch, (2012), Bemiller (1997) y Schmitz et al., (2006), señalan que las modificaciones químicas pueden ser: monofuncionales (uso de anhídrido acético, enlaces éster, éter y óxido de propileno); polifuncionales (utilizando oxiclорuro de fósforo, grupos éster, grupos éter y epiclorhidrina); por doble derivación (por ejemplo, empleando anhídrido acético más oxiclорuro de fósforo); oxidativas (oxidación con hipoclorito de sodio por formación de grupos carboxilos y carbonilos a expensas del grupo hidroxilo) e hidrolíticas (hidrólisis ácidas para el acortamiento de las cadenas).

Sin embargo, Wurzburg (1986); Light, (1990) y Thomas & Atwell, (1999), clasifican las técnicas de modificación química de almidón en dos grandes categorías: las de conversión o degradación (hidrólisis, oxidación, dextrinización, conversión enzimática) y las de derivación o sustitución (entrecruzamiento, estabilización, adición de grupos funcionales).

La velocidad y la eficacia del proceso de modificación química dependen del tipo de reactivo, la fuente botánica, su tamaño y estructura de gránulos (Huber & Bemiller, 2001). La distribución del tamaño de los gránulos es un factor importante que afecta el grado o la extensión de la reticulación (Van Hung & Morita, 2005) ya que los gránulos pequeños se derivan en mayor medida que los gránulos grandes debido a su mayor superficie.

3.4.2.1 *Modificación química por conversión o degradación*

Este proceso consiste en la degradación o despolimerización de las moléculas de almidón provocando la escisión de algunos enlaces glucosídicos, y dependiendo del método utilizado para la modificación, pueden incluirse alteraciones químicas, tales como la oxidación de algunos de los grupos hidroxilo, aldehídos, cetonas y carbonilos. Esta técnica tiene como objetivos: i) reducir la viscosidad de los productos, para que, con altas concentraciones de almidón, la suspensión tenga buenas propiedades de flujo; ii) incrementar la solubilidad en agua fría; iii) controlar la fuerza del gel y iv) otorgar estabilidad a las suspensiones de almidón (Wang et al., 2003; Taggart, 2004; Singh et al., 2007).

Liu et al., (1999); Perera & Hoover, (1999); Lawal, (2004); Shujun et al., 2008; indican que los métodos más comunes de conversión utilizados en la industria de alimentos incluyen la hidrólisis ácida, la oxidación y la conversión enzimática; éstos modifican las propiedades morfológicas, cristalinas y de gelatinización, afectando las temperaturas de transición y las entalpías de gelatinización, así como las propiedades viscoelásticas del almidón modificado.

Hidrólisis ácida

Entre los métodos de modificación química de almidones, mencionados anteriormente, la técnica de la hidrólisis ácida es una de las más utilizadas en la industria de obtención de almidones modificados, destinados a la industria de alimentos, papelera y textil (Coultate, 1998; Sitohy et al., 2000; Wang et al., 2003).

El procedimiento tradicional para obtener almidones por modificación ácida consiste, en términos generales, en tratar una suspensión concentrada de almidón a una temperatura menor que la temperatura de gelatinización, con soluciones diluidas de un ácido mineral (HCl ó H₂SO₄) durante cierto período de tiempo, provocando modificaciones superficiales que debilitan la estructura de los gránulos de almidón (Wurzburg, 1986; Wang et al., 2007).

En la hidrólisis ácida, los enlaces glucosídicos $\alpha(1-4)$ y $\alpha(1-6)$ que mantienen unidas a las moléculas de anhidro D-glucosa, se rompen al azar, con formación intermedia de maltosa (disacárido constituido por dos unidades de glucosa) y dextrinas (polímeros de glucosa solubles en agua); para su conversión final, dependiendo el grado de hidrólisis, en moléculas de D- glucosa (Beyer et al., 1987; Jury et al., 1994; Coultate, 1998).

Es importante mencionar que la cantidad de amilosa del almidón tiene afectaciones en la reacción de hidrólisis del mismo. Taylor & Francis (2013) sostienen que un almidón con alto contenido de amilosa es menos susceptible a la hidrólisis ácida que uno con bajo contenido de amilosa. Esto se puede atribuir a dos situaciones; las moléculas de amilosa se agrupan lo que resulta en una organización más compacta de las regiones amorfas del almidón dificultando el acceso a estas regiones, o bien, ya que la amilosa restringe la hinchazón de los gránulos hace que la penetración de los iones hidrógeno sea más lenta dificultando su acceso a ellos.

Atichokudomchai et al., (2000) al evaluar el efecto de la modificación ácida sobre almidones de yuca, determinaron que el grado de cristalinidad de los gránulos aumentaba rápidamente a medida que se incrementaba el tiempo de hidrólisis, producto de la disminución en el contenido de amilosa, ya que dichas moléculas se ubican principalmente en la superficie de los gránulos. Sin embargo, la hidrólisis de las moléculas de amilopectina solamente ocurría una vez hidrolizadas todas las moléculas de amilosa.

Los almidones modificados por hidrólisis ácida muestran elevadas temperaturas de gelatinización, una rápida cocción, baja viscosidad de la pasta en caliente y geles con buenas características al enfriar (Wang & Wang, 2001; Lawal, 2004).

En la industria alimenticia, son utilizados principalmente en la fabricación de caramelos de goma; ya que la baja viscosidad que desarrollan estos almidones, aún a elevadas temperaturas, permite su fácil manejo en caliente, formando un gel firme al enfriarse (Jenkins & Donald, 1997; Shujun et al., 2008).

3.4.2.2 *Modificación química por derivación o sustitución*

Consiste en incorporar grupos químicos a las unidades de glucosa, los cuales van a sustituir a los grupos hidroxilo. Las propiedades del almidón derivado dependen de la naturaleza de la derivación y del grado de sustitución. Cuando el grado de sustitución es bajo (hasta 0,1 moles de grupos incorporados por mol de glucosa), los grupos sustituyentes rompen la linealidad de la molécula donde son incorporados, disminuyendo su tendencia a asociarse, previniendo la retrogradación. Sin embargo, elevados niveles de sustitución (desde 0,8 hasta 1 moles) hacen a los almidones solubles en agua fría (Wurzburg, 1986; Rutenberg & Solarek, 1994).

La modificación química por derivación incluye el entrecruzamiento (“crosslinked”), la estabilización y la incorporación de grupos funcionales (Light, 1990; Thomas y Atwell, 1999; Taggart, 2004).

Almidones esterificados

Los almidones pueden ser esterificados utilizando diferentes tipos de ácidos inorgánicos y orgánicos. Los nitro-almidones, utilizados como explosivos, se obtienen con el ácido nítrico (HNO₃); no obstante, con ácidos fosfóricos y fosfatos alcalinos, así como con los ácidos acético, succínico, adípico, cítrico o con derivados como el acetato de vinilo se obtiene un variado número de ésteres de almidón (Manatsathit, 1983; Biliaderis, 1982 y Rutenberg & Solarek, 1994).

En presencia de ortofosfato se produce almidón fosfato monoéster, a valores de pH entre 5,0 y 6,5, en un tiempo que va desde 30 minutos a 6 horas, a una temperatura de 120-160°C. Sin embargo, cuando se utiliza tripolifosfato de sodio, la reacción ocurre en condiciones alcalinas, con valores de pH entre 8,5 y 9,0; y a temperaturas comprendidas entre 100 y 120°C (Seow & Thevamaralar, 1993; Liu et al., 1998).

La fosfatación es uno de los métodos de modificación por esterificación más utilizado, ya que a través de éste se produce una repulsión entre las cadenas adyacentes del almidón, causada por la introducción de grupos fosfato con carga negativa, los cuales

provocan una reducción en el número de asociaciones entre las cadenas de almidón y un aumento en la capacidad de hidratación (Biliaderis, 1982; Lim & Seib, 1993; Sivoli et al., 2005).

3.5 Diseño experimental

El diseño experimental es una herramienta de importancia fundamental en el ámbito de la ingeniería para mejorar el desempeño de un proceso de manufactura. También tiene múltiples aplicaciones en el desarrollo de nuevos procesos (Montgomery, 2004). La aplicación de las técnicas del diseño experimental en las fases iniciales del desarrollo de un proceso puede redundar en mejoras en rendimientos de procesos, en reducir la variabilidad, reducción en tiempo de desarrollo y reducción de costos globales.

3.5.1 *Diseño experimental de Taguchi*

El modelo matemático de Taguchi, también conocido como la metodología de diseño robusto de Taguchi, es una técnica utilizada para el diseño y la optimización de experimentos. Se basa en la idea de que los factores y sus niveles tienen un impacto en la variabilidad de la respuesta o variable dependiente (Montgomery, 2004). El objetivo de este modelo es encontrar la combinación óptima de los mismos que minimice la variabilidad y maximice el rendimiento deseado.

Una de las herramientas clave en esta metodología es el análisis de efectos principales, que permite evaluar el impacto individual de cada factor sobre la respuesta. Este análisis se realiza a través de representaciones gráficas que muestran cómo los niveles de los factores afectan la variabilidad y el valor de las variables de interés. Esto facilita la identificación de los factores más influyentes y de las combinaciones óptimas, proporcionando una perspectiva clara y detallada sobre cómo los factores interactúan y afectan el comportamiento del sistema estudiado.

IV. METODOLOGÍA

El presente trabajo se centró en la optimización de los parámetros operacionales para la modificación del almidón de yuca industrial a escala de laboratorio. El desarrollo se basó en investigaciones previas, con el objetivo de aportar conocimientos en el campo de la modificación de almidones. Se trata de una investigación de carácter mixto que combina elementos de investigación aplicada y tecnología de los alimentos.

El enfoque aplicado buscó potenciar las propiedades del almidón nativo de modo que los resultados obtenidos puedan ser apropiados para su uso en la industria alimentaria. Esto implicó identificar y ajustar variables como la temperatura, el tiempo de reacción, la concentración de reactivos y pH para lograr las modificaciones en el almidón de yuca nativo industrial. La fase experimental para la modificación del almidón nativo de yuca mediante los procesos de hidrólisis ácida y fosfatación se realizó en el laboratorio de alimentos del programa académico de Ingeniería Química (PAIQ) de la Universidad Nacional de Ingeniería.

4.1 Material

4.1.1 *Materia Prima*

El almidón de yuca utilizado fue de tipo nativo, obtenido a partir de raíces de yuca de diversas variedades (INTA Amarilla, INTA Reyna, INTA Tololar, Blanca Criolla, Ceiba, Valencia y Perú). Este almidón es extraído y distribuido por la industria ALCASA de Nicaragua (Figura 4). Los reactivos empleados fueron de grado analítico, incluyendo ácido clorhídrico (HCl), hidróxido de sodio (NaOH) y Tripolifosfato de sodio (TPS). Además, se utilizó una solución tampón para estandarizar la solución titulante; en este caso, se empleó ftalato ácido de potasio (KHP), adecuado para la estandarización de bases como el NaOH y Fenolftaleína 1% como indicador.

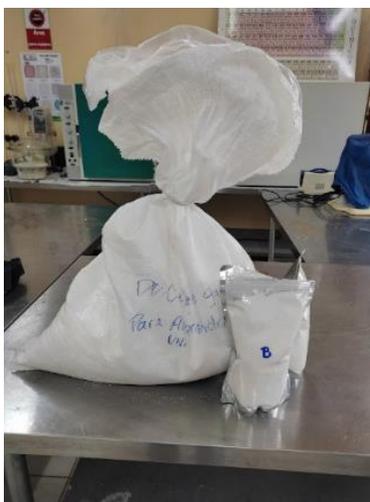


Figura 4: Almidón de yuca nativo procedente de la Industria ALCASA. (Elaboración propia)

4.1.2 Materiales y Equipos de laboratorio

Los materiales y equipos que se utilizaron para el desarrollo de cada una de las pruebas realizadas de acuerdo a los métodos establecidos se detallan en la tabla 4.

Tabla 4: Materiales y equipos para la caracterización del almidón nativo y modificado

Prueba	Materiales y Equipos de laboratorio
Viscosidad Brookfield	Viscosímetro Brookfield Lamy Rheology B-One Plus (Ver Figura 2.3 en anexos II) Aguja L2 (Ver Fig.2.4 en anexos II). Vaso de precipitado de vidrio de 500 mL.
Temperatura de Gelatinización	Balanza semi -analítica con una precisión de 0.01 g. Termobalanza OHAUS. Vasos de precipitado de vidrio de 500 mL. Espátula. Varilla de Agitación. Viscógrafo Brabender-E (Ver Fig.2.5 en anexos II).
Índice de Absorción de agua e Índice de Solubilidad	Balanza analítica con una precisión de 0.01 g. Vasos de precipitado de vidrio de 50 mL. Baño de agua con T Cte. Termobalanza OHAUS. Centrifuga CORNING (Ver Fig.2.6 en anexos II). Tubos de centrifuga plásticos de 50 mL. Horno TERMOSTATIC con T Cte (Ver Fig.2.7 en anexos II). Agitador – Calentador (Ver Fig.2.8 en anexos II). Desecador Espátula. Probeta de 10 ml Probeta de 30 ml
Acidez Titulante	Balanza analítica con una precisión de 0.01 g. Erlenmeyers de vidrio de 250 mL. Probeta de 100 mL.

Bureta de 50 mL.
Agitador Magnético
Embudo de porcelana
Bomba de vacío (Ver Fig.2.9 en anexos II).

Beakers de 1000 ml
Espátula
Agitador-calentador CORNING
Termómetro
Agitador magnético
Bomba de vacío
Embudo de porcelana
Procesos de Modificación Matraz Kitasato 2000 ml
Tamices de malla 60 y 230 (Ver Fig.2.11 en anexos II)
Balanza semi analítica con una precisión de 0.01 g
pH-metro Thermo Scientific (Ver fig.2.10 en anexos II)
Pistola de aire caliente (Ver Fig.2.12 en anexos II)

Fuente: Adaptado y recopilado de “Guía técnica para la producción y análisis de almidón de yuca” (Aristizábal & Sánchez, 2007)

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterización de almidón nativo y modificados

- **Determinación del índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA)**

Ambas técnicas se determinaron de acuerdo al método de Anderson, Conway, Pfeiffer y Griffin (1996) sugerido por la Guía técnica de producción y análisis de almidón de yuca (2007). Para cada muestra, en un tubo de centrifuga de 50 ml previamente pesado, se colocaron 1.25 gramos de almidón en base seca (se consideró la humedad de cada muestra con ayuda de una termobalanza OHAUS y se calculó el peso en base seca con la ecuación 1) y 30 ml de agua destilada precalentada a 60 °C, se tapó y agitó vigorosamente durante 1 min. Luego se sometió a baño maría a una temperatura de 60 °C en un agitador- calentador marca CORNING a 200 rpm durante 30 minutos (agitando individualmente cada tubo 1 min pasados los primeros 10 minutos). Finalizado el tiempo, los tubos a temperatura ambiente se sometieron a centrifugación en una centrifuga marca CORNING durante 30 min a 4 900 rpm. El gel sedimentado se separó por decantación (figura 5.a), registrando el peso del tubo de centrifuga con

el gel y el volumen del sobrenadante en una probeta, de este se tomaron 10 ml y se vació en un vaso de precipitado de 50 ml previamente pesado dejándolo evaporar durante 24 horas a 70 °C en un horno TERMOSTATIC (figura 5.b). Por último, los vasos de precipitado se dejaron enfriar por una hora en un desecador y se pesaron para obtener el peso de los sólidos solubles.

Los datos a detalle para el cálculo de estos dos parámetros se encuentran en las tablas 1.1, 1.2 y 1.3 del Anexo I de este informe. Y se calcularon con la ecuación 2 y 3 respectivamente.

$$\text{Peso en base seca} = \frac{\text{Peso deseado}}{1 - \text{Humedad}} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{IAA} = \frac{\text{Peso del Gel (g)}}{\text{Peso muestra (g) bs}} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{ISA} = \frac{\text{Peso Solubles (g)} * V * 10}{\text{Peso muestra (g) bs}} \quad (\text{Ec. 3})$$



a)



b)

Figura 5: a) Gel sedimentado para determinar sólidos insolubles; b) secado del sobrenadante para determinar sólidos solubles. (Elaboración propia)

- **Determinación de Temperatura de Gelatinización**

Aunque existen métodos para determinar la propiedad de gelatinización en almidones, como el propuesto por Aristizábal & Sánchez (2007), las tecnologías actuales permiten

registrar este valor de manera más confiable y precisa. Por lo tanto, esta propiedad se determinó utilizando un Viscógrafo Brabender-E. Este procedimiento implicó determinar el peso real de la muestra mediante la preparación de una solución de almidón con un 7% de sólidos, basándose en una muestra de 450 ml. Trabajar la solución de almidón a esa concentración era específica como parte de la metodología determinada para el uso del equipo. El cálculo necesario se llevó a cabo con la ecuación 4, esta aseguraba el peso real en materia seca de la muestra de almidón para hacer la medición en el equipo de manera más precisa. La solución se colocó en el equipo y se configuró para su respectivo análisis.

$$\text{Peso real de muestra} = \frac{\frac{450 * \%sólidos}{100}}{\frac{100 - \%Humedad}{100}} \quad (\text{Ec. 4})$$

El viscógrafo Brabender-E presenta los resultados del análisis de la solución de manera gráfica, a través de un viscograma. Este gráfico muestra cómo cambia la muestra en función de la temperatura y el tiempo, midiendo en Unidades Brabender (BU). Estas unidades permiten evaluar las propiedades de gelatinización y viscosidad de la muestra, proporcionando una comprensión detallada de su comportamiento durante el calentamiento y enfriamiento.

Además del viscograma, el viscógrafo Brabender-E presenta una tabla que resume los puntos clave medidos en el gráfico. Entre estos puntos se encuentran el punto de gelatinización, la viscosidad máxima en caliente, la viscosidad mínima en frío y la viscosidad máxima en frío, entre otros. Para cada uno de estos puntos, se proporciona información detallada sobre el tiempo, la temperatura y las Unidades Brabender (BU).

- **Determinación de viscosidad Brookfield**

Para determinar la Viscosidad del almidón se empleó la técnica usada por ISI (2002) citada en la Guía técnica de producción y análisis de almidón de yuca (2007). Dicha metodología se correspondía con el procedimiento realizado por el equipo Viscógrafo Brabender, por lo que la muestra resultante después de su análisis correspondiente a la temperatura de gelatinización, se colocó en un vaso de precipitado, se dejó enfriar a 25 °C y se midió la viscosidad en un Viscosímetro Brookfield modelo B-one Plus debidamente calibrado, con aguja L2 a una velocidad de 10 RPM y durante un tiempo de 50 Seg (figura 6).



Figura 6: Medición de la viscosidad de muestra. (Elaboración propia)

- **Determinación de índice de Acidez**

El grado de acidez del almidón se determinó por el método de titulación que sugiere la Guía técnica de producción y análisis de almidón de yuca (2007). Para ello, se preparó una solución de 20 gramos de almidón en base seca utilizando la ecuación 1 con 100 ml de agua destilada, se homogenizó y se filtró al vacío. Del filtrado se tomó una muestra de 50 mL y se tituló con hidróxido de sodio 0.1 N previamente estandarizado con una solución patrón de KHP, utilizando fenolftaleína como indicador (figura 7).

Los cálculos se realizaron con la ecuación 5 y los resultados se presentan en las tablas 1.4, 1.5 y 1.6 del Anexo I de este informe.

$$Na * Va = Nb * Vb \quad (Ec. 5)$$

Na = Normalidad del ácido.

Va = Volumen del ácido.

Nb = Normalidad de la base.

Vb = Volumen de la base.

Unidades = meq de ácido láctico/g (base seca)



Figura 7: Titulación de muestra. (Elaboración propia)

4.2.2 Modificación del almidón nativo de yuca mediante hidrólisis ácida

Para la modificación del almidón nativo de yuca por medio de hidrólisis ácida la metodología empleada se adaptó de los trabajos realizado por Salcedo et al., (2017) y Vargas et al., (2019) con ligeras modificaciones. Se preparó una solución concentrada de almidón utilizando una relación de 1.2 L de agua por cada kilogramo de almidón nativo. Se sometió a calentamiento con agitación constante durante el tiempo y a la temperatura especificada en el diseño experimental para cada tratamiento. Una vez alcanzados dichos valores se agregó el HCl necesario para la concentración de ácido requerida, en ese momento dio inicio la reacción de hidrólisis cuidando las condiciones del proceso, en este caso, tiempo, temperatura y agitación constante (580 rpm) (figura 8.a) Al finalizar el tiempo, se detuvo la reacción neutralizando la solución con NaOH al 3%. El almidón obtenido fue lavado con agua destilada y filtrado al vacío hasta recuperar la mayor cantidad (figura 8.b), se colocó en bandejas de aluminio (figura 8.c) para ser sometido a un proceso de secado utilizando una pistola de aire caliente (figura 8.d), Se pulverizó y tamizó en mallas número 60 y 230 (figura 8.e), seguidamente se midió el porcentaje de humedad entre 12-14%, con ayuda de una termobalanza (figura 8.f) para su posterior empaque y almacenamiento (figura 8.g).

4.2.3 Modificación del almidón nativo de yuca por fosfatación con Tripolifosfato de Sodio (TPS).

El proceso de fosfatación para la modificación del almidón nativo de yuca se realizó de acuerdo a la teoría descrita por Wurzburg, (1986) en su libro Modificación de almidones: propiedades y usos. El proceso consistió en preparar una solución acuosa concentrada utilizando la misma relación de 1.2 L de agua por cada kilogramo de

almidón nativo, luego se calentó hasta llegar a 40 °C para posteriormente agregar la cantidad de TPS, este representada en un porcentaje peso/peso de acuerdo al diseño experimental. Esta reacción se debe llevar a cabo a pH básicos, por lo que se ajustó el pH a 8.5 con NaOH una vez iniciada la reacción y cuidando las condiciones del proceso, en este caso, tiempo, temperatura y agitación constante (580 rpm). Una vez pasado el tiempo de reacción se neutralizó la solución con HCl para detener el proceso de fosfatización y se retiró el agua por filtración al vacío. Finalmente se secó con una pistola de aire caliente hasta obtener un almidón con una humedad entre 12-14%. Se pulverizó y tamizó en mallas número 60 y 230 para su posterior empaque y almacenamiento.

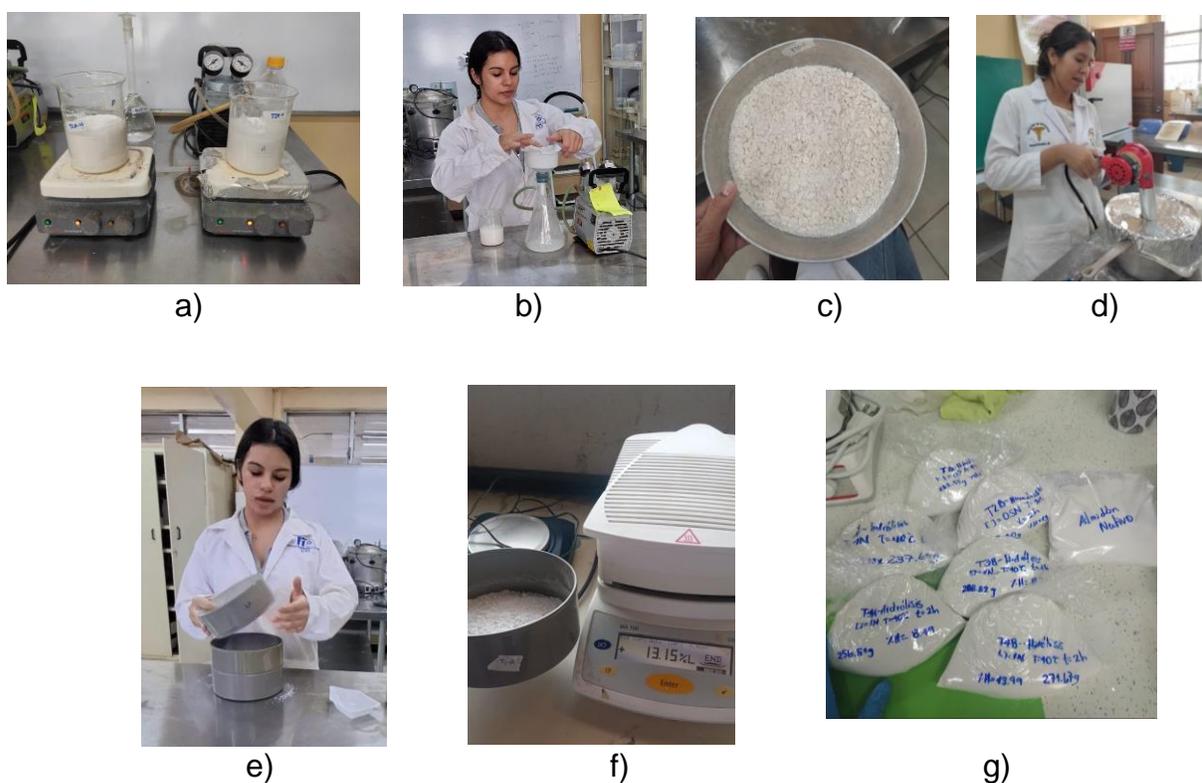


Figura 8: Proceso de modificación química para métodos de hidrólisis ácida y fosfatización. (Elaboración propia)

4.3 Diseño experimental

Para el desarrollo de la investigación se consideraron 2 factores para el proceso de hidrólisis y 2 factores para el proceso de fosfatación mediante el diseño experimental de Taguchi, mismo que fue seleccionado por su simplicidad y afinidad al enfoque de optimización planteado en la investigación, permitiendo evaluar de manera eficiente los factores seleccionados con un número reducido de experimentos. Para cada caso, los factores y niveles se especifican en la tabla 5.

Con los factores del diseño seleccionados se establecieron los rangos en los que se hicieron variar estos factores, así como los niveles específicos con los que se realizaron las corridas. En este caso se consideraron dos niveles por factor, uno alto y uno bajo.

Tabla 5: Factores y niveles del diseño experimental

Factor	Niveles	
	Bajo	Alto
Concentración de ácido (C_A)	0.5 N	1.0 N
Tiempo de hidrólisis (t_H)	1 hora	2 horas
Concentración de Tripolifosfato de sodio (C_{TPS})	0.1 % (p/p)	0.5% (p/p)
Tiempo de fosfatación (t_F)	0.5 horas	1 horas

Fuente: Elaboración propia

En este estudio experimental, se aplicaron 4 tratamientos que combinaron los diferentes factores y sus niveles descritos en la tabla 5 para cada procedimiento. Dichos tratamientos se diseñaron para manipular el tiempo de reacción y la concentración de ácido y tripolifosfato a utilizar, dejando como parámetros fijos la temperatura a 40 °C para ambos procesos y pH a 8.5 solamente para la modificación por fosfatación. En ese sentido se utilizó el software Minitab V14 para obtener los tratamientos a aplicar, de modo que se obtuvieron las combinaciones proyectadas en las tablas 6 y 7.

Tabla 6: Tratamientos para la modificación del almidón de yuca por hidrólisis ácida

N.	C_A (N)	t_H (h)
1	0.5	1
2	0.5	2
3	1.0	1
4	1.0	2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Tratamientos para la modificación de almidón de yuca por fosfatación

N.	C _{TPS} (%p/p)	t _F (h)
1	0.1	0.5
2	0.1	1.0
3	0.5	0.5
4	0.5	1.0

Fuente: Elaboración propia

Cada tratamiento, establecidos sus valores mínimos y máximos a utilizar, se realizaron por duplicados (A y B), siendo un total de 16 experimentos, 8 por hidrolisis ácida y 8 por fosfatación. Se hace notar que todos los experimentos se realizaron con muestras de almidón nativo del mismo lote proporcionados por la empresa ALCASA.

A continuación, la tabla 8 presenta la codificación utilizada para el registro de los datos experimentales. En el cual T= tratamiento, A = muestra, B = muestra, H = hidrolisis y F= fosfatación

Tabla 8: Códigos de tratamientos para registro de datos experimentales

# de Tratamiento	Condiciones de Operación	
	C _A (N)	t _H (h)
T1A-H	0.5	1
T1B-H		
T2A-H	0.5	2
T2B-H		
T3A-H	1	1
T3B-H		
T4A-H	1	2
T4B-H		

# de Tratamiento	C _{TPS} (%p/p)	t _F (h)
T1A-F	0.1	0.5
T2A-F		
T2B-F	0.1	1
T3A-F		
T3B-F	0.5	0.5
T4A-F		
T4B-F	0.5	1

Fuente: Elaboración propia

4.4 Variable respuesta

Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas: morfología y estructura del gránulo, contenido de proteína de almidón,

composición proximal, índice de acidez y contenido de amilosa (Aristizábal & Sánchez, 2007). Por otro lado, las propiedades funcionales son; temperatura de gelatinización y retrogradación, solubilidad, hinchamiento, absorción de agua y comportamiento reológico de sus pastas y geles (Wang, White, 1994, citado en Hernández-Medina et al., 2008).

Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación consideró como variables dependientes la propiedad fisicoquímica de índice de acidez, y como propiedades funcionales la viscosidad, temperatura de gelatinización, ISA e IAA, mismas que fueron definidas para calificar su impacto en la modificación química del almidón de acuerdo a cada método.

V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este acápite se presentan los resultados obtenidos y la discusión de los mismos, donde se han caracterizado las muestras de almidón, tanto nativo como modificados por hidrólisis ácida y fosfatación y se hace la comparación de los mismos. Además, se muestra como punto principal la optimización del proceso a través del diseño de experimentos Taguchi y el método de gráficos.

5.1 Propiedades fisicoquímicas del almidón industrial de yuca nativo

La caracterización del almidón nativo de yuca se llevó a cabo empleando la metodología descrita con anterioridad, con el objetivo de hacer una comparación entre las propiedades del mismo y las de los sometidos a modificación por ambos métodos, hidrólisis ácida y fosfatación. A continuación, se presenta la tabla 9 con los resultados promedio de cada parámetro puesto que cada medición se hizo por duplicado.

Tabla 9: Propiedades fisicoquímicas del almidón nativo de yuca

Propiedad	Muestra A	Muestra B	Promedio	Literatura
Viscosidad a 25°C (mPa.s)	21 540.00	20 910.00	21 225.00	840-1 500
Temperatura de gelatinización (°C)	67.00	67.00	67.00	57.5-70
ISA (%)	0.43	0.57	0.50	0.27-12.32
IAA (%)	3.94	3.97	3.96	0.82-15.52
Índice de acidez (meq ácido láctico/ g almidón)	0.0004	0.0006	0.0005	0.0022-0.005

Fuente: Elaboración propia

El valor promedio de viscosidad a 25°C para el almidón nativo de yuca fue de 21 225 mPa.s, notablemente superior al rango de 840 a 1 500 mPa.s reportado en la guía técnica de Aristizábal & Sánchez (2007). Es importante señalar que los valores de referencia en la literatura se basan en geles de yuca con una concentración del cinco por ciento, mientras que en este estudio se empleó una concentración del siete por ciento para las muestras analizadas. Esta diferencia en la concentración explica en gran medida la discrepancia en los valores de viscosidad, ya que un aumento en la concentración de almidón incrementa la densidad de la red de polímeros en el gel, lo que resulta en una viscosidad significativamente mayor.

La temperatura promedio de gelatinización de 67°C se encuentra dentro del rango reportado por los estudios de Salcedo (2017) y Aristizábal & Sánchez (2007). Esto sugiere que el almidón nativo empleado presenta un comportamiento térmico típico de los almidones de yuca, independientemente de la variedad empleada, lo cual indica que no hubo alteraciones significativas en su estructura cristalina ni en su capacidad de absorber agua durante el calentamiento.

El ISA obtenido fue de 0.50%, significativamente inferior a los reportados por la literatura para almidones de ñame (1.25 – 2.79%), yuca (2.60 - 3.70%) y papa (2.97%)

en el estudio realizado por Alvis et al., (2008). Sin embargo, según Aristizábal & Sánchez, (2007), en el almidón de yuca, el índice de solubilidad varía entre 0.27 – 12.32%; este intervalo y el reportado por Salcedo et al., (2017) de 0.21% se acercan más al obtenido en esta investigación. La baja solubilidad observada en este estudio sugiere una estructura más estable y resistente a la disolución, en comparación con los valores promedio reportado para otros almidones nativos de yuca. De acuerdo a Hwang & Kokini, (1992), la estructura ramificada de la amilopectina facilita la penetración de agua, lo que aumenta la solubilidad del almidón. En contraste, una menor proporción de amilopectina o una mayor cantidad de amilosa reduce la solubilidad, dado que la amilosa contribuye a una organización más compacta del gránulo, limitando la entrada de agua y dificultando la disolución (Malin & Nilsson, 2018). Así, el bajo ISA obtenido podría estar indicando una estructura de gránulo más densa o un contenido relativamente alto de amilosa en el almidón nativo de yuca empleado, lo que contribuye a una menor capacidad de solubilidad en agua en comparación con otros almidones de fuentes distintas o variedades de yuca.

En cuanto al IAA, se obtuvo un valor de 3.96%, el cual también se encuentra dentro del rango de referencia de 0.82 - 15.52% sugerido por la misma guía. Además, este valor osciló entre los encontrados en la literatura para cuatro variedades de almidón de ñame (2.32 – 2.39%), para almidón de papa (5.83%) y para almidones de yuca (4.63 – 4.80%) (Alvis et al., 2008). Esta diferencia en el IAA puede estar relacionada con la fuente biológica o variedad de la misma, las condiciones de cultivo, extracción y procesamiento, con el tamaño o la forma del gránulo (Lindeboom et al., 2004).

Para el índice de acidez (IA) se obtuvo un valor promedio de 0.0005 meq de ácido láctico/g de almidón, un valor notablemente inferior al rango de referencia reportado por Aristizábal & Sánchez, (2007) quienes sitúan entre 2.2×10^{-3} y 5×10^{-3} meq de ácido láctico/g de almidón. Esta diferencia podría atribuirse a una menor presencia de grupos funcionales ácidos en el almidón nativo analizado o a variaciones de cultivo y procesamiento, de manera que este bajo valor de IA sugiere una estructura de almidón con menor cantidad de impurezas ácidas o de compuestos ácidos asociados, lo que podría indicar una mayor estabilidad química del mismo.

Adicionalmente se presenta en la figura 9 el comportamiento del almidón nativo de yuca mediante un viscoamilograma. El gráfico representa cuatro puntos clave: A, comienzo de la gelatinización; B, viscosidad máxima caliente (1 025 BU) un valor muy similar al de Arrieta & Pérez Sira (1996) quienes reportan un valor de viscosidad máxima superior a las 1 000 BU para el almidón nativo de yuca; C, viscosidad mínima frío y D, viscosidad máxima frío, para la evaluación del comportamiento reológico del almidón sometido a cambios de temperatura. un valor muy similar al de Arrieta & Pérez Sira (1996) quienes reportan un valor de viscosidad máxima superior a las 1 000 BU para el almidón nativo de yuca.

Cabe mencionar que este análisis se hizo para cada uno de los tratamientos de manera duplicada, por lo que se puede observar su comportamiento respecto al del almidón nativo, estos viscoamilogramas se encuentran en el Anexo III de este documento.

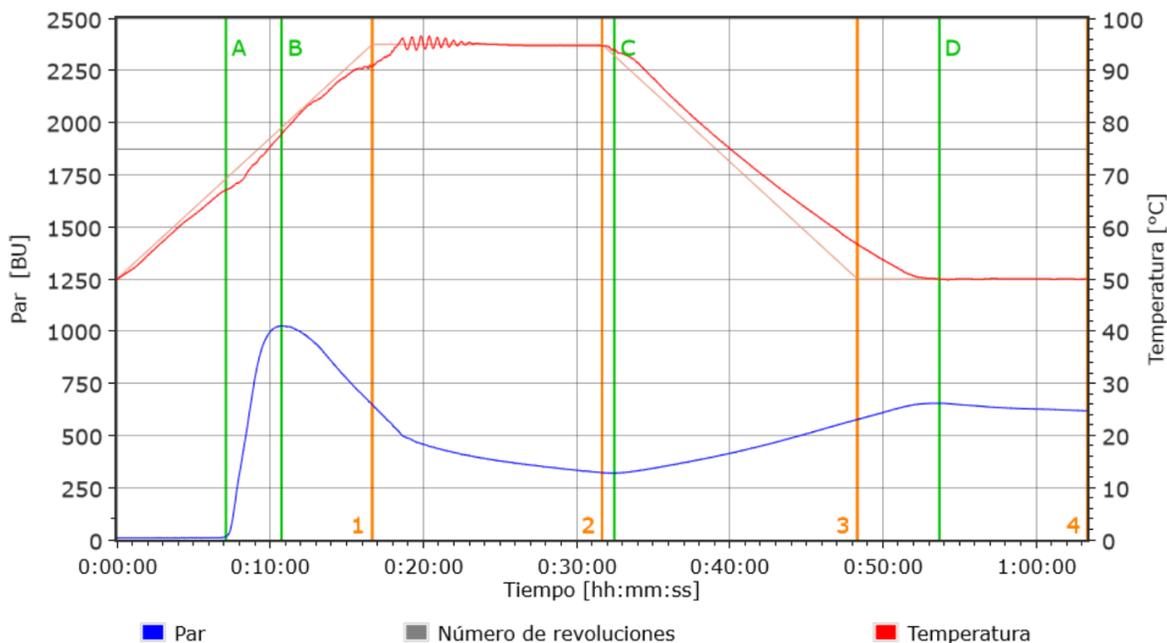


Figura 9: Viscoamilograma del almidón nativo de yuca. (Elaboración propia)

5.2 Parámetros de operación de la hidrólisis ácida y fosfatación para modificación de almidones.

5.2.1 Hidrólisis ácida

Analizando cada respuesta en función de los gráficos en la figura 10 se puede observar que la viscosidad disminuye con una mayor concentración y tiempo, esto sugiere que la hidrólisis ácida degrada las cadenas de almidón más rápidamente a mayores valores en dichos parámetros. Para minimizar la viscosidad, los valores altos en ambos factores serían preferibles, sin embargo, una menor concentración podría reducir costos si la reducción no necesita ser extrema.

Por otro lado, la temperatura de gelatinización representado en la figura 11 aumenta con la concentración y disminuye moderadamente con el tiempo. Una menor concentración podría ser suficiente si se quiere simplificar el proceso. Considerando que el tiempo tiene menos impacto sobre dicha variable se puede optar por un tiempo de una hora para reducir la variabilidad sin afectar demasiado la gelatinización.

En lo que se refiere al ISA e IAA. Ambos disminuyen con el aumento de la concentración y el tiempo (figura 12 y 13) sin embargo, para la solubilidad el parámetro tiempo de reacción es más determinante, mientras que para índice de absorción es la concentración de reactivo. En ambos casos, según lo expuesto anteriormente conviene usar la concentración más baja y el tiempo más bajo de reacción. Las mismas condiciones serían aplicables al índice de acidez mostrado en la figura 14, ya que al ser valores significativamente bajos, el valor de la concentración y tiempo es indistinta, prefiriendo los más bajos por efectos de simplificar el proceso.

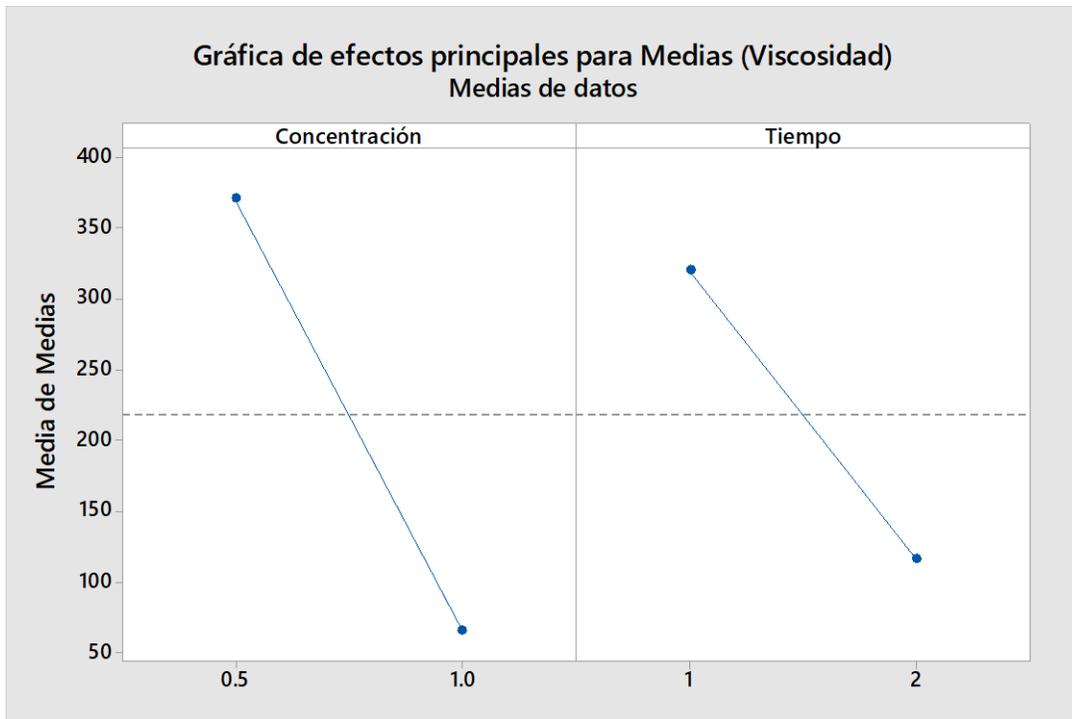


Figura 10: Análisis de efectos principales del proceso de hidrolisis en la variable viscosidad. (Elaboración propia)

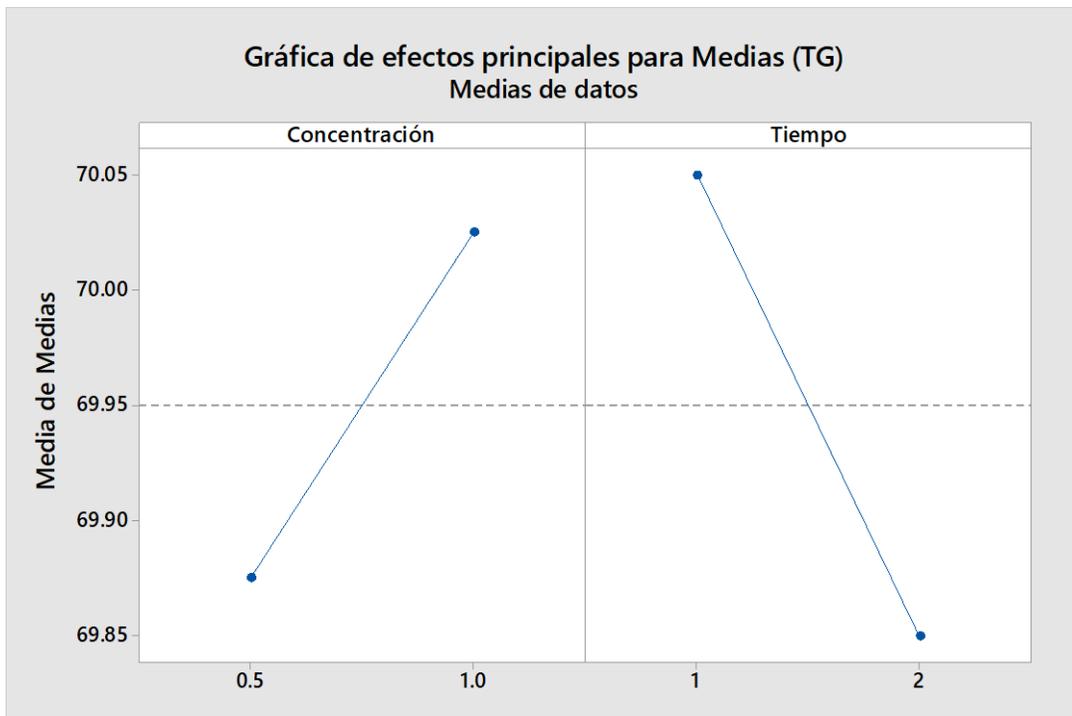


Figura 11: Análisis de efectos principales del proceso de hidrolisis en la variable temperatura de gelatinización. (Elaboración propia)

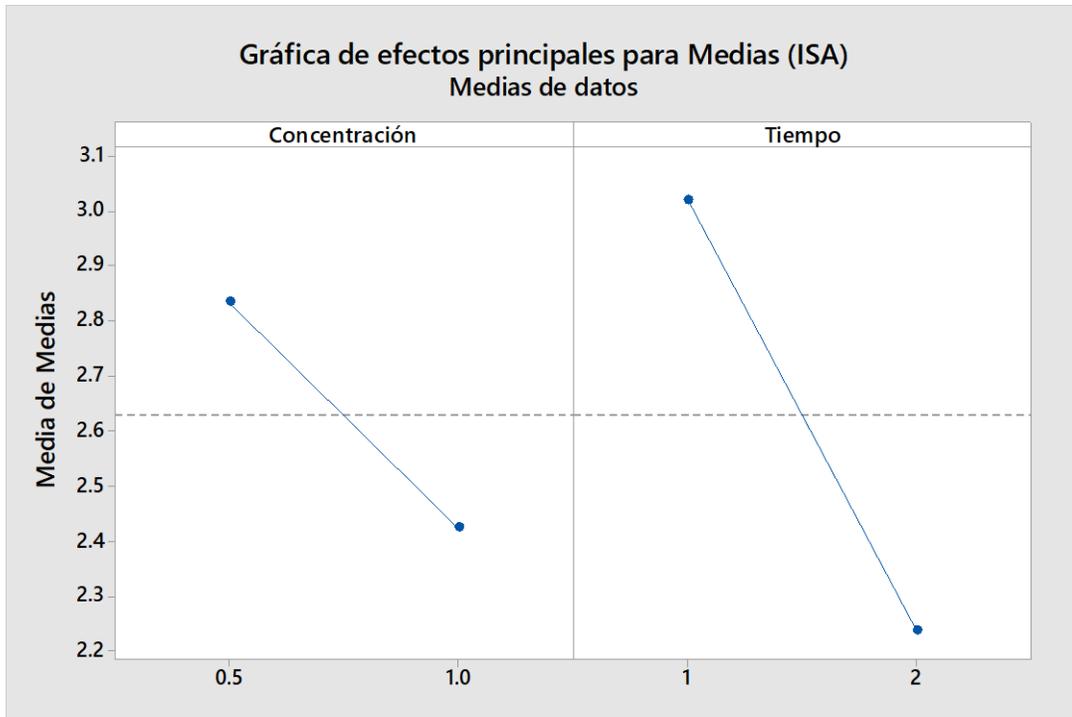


Figura 12: Análisis de efectos principales del proceso de hidrólisis en la variable ISA.
(Elaboración propia)

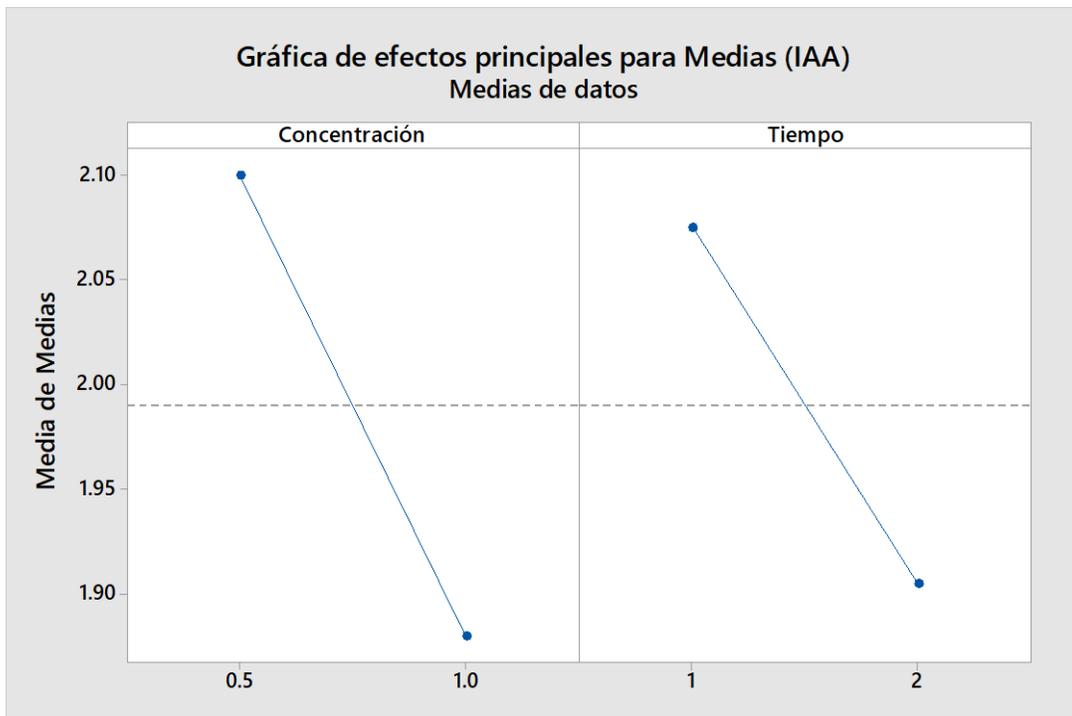


Figura 13: Análisis de efectos principales del proceso de hidrólisis en la variable IAA.
(Elaboración propia)

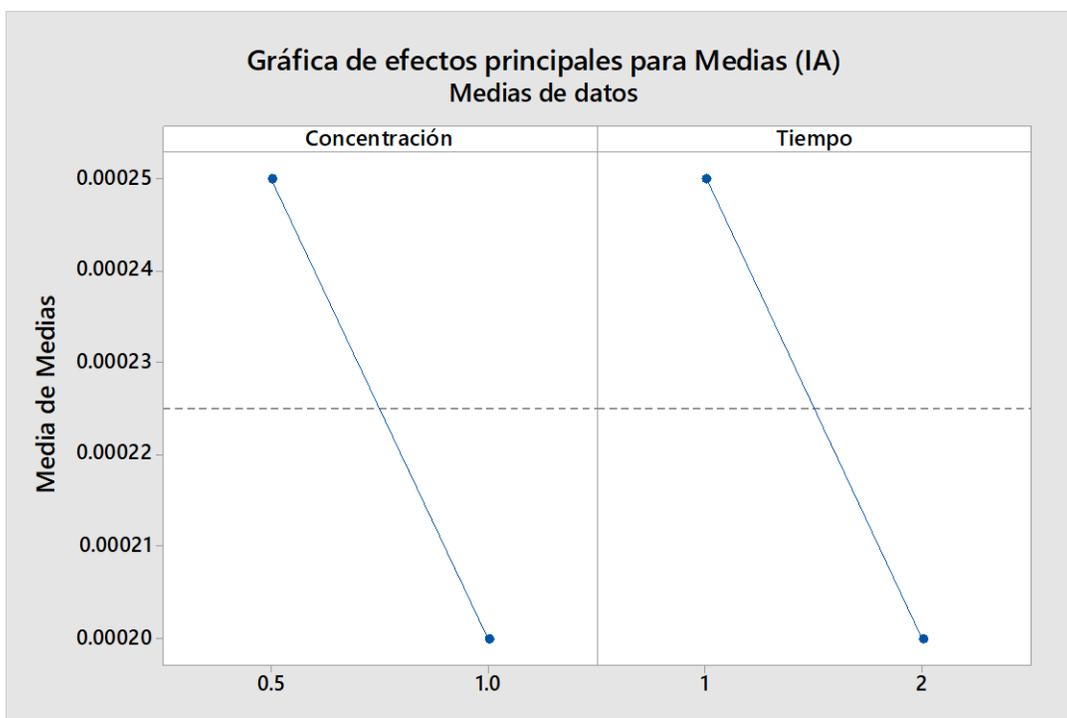


Figura 14: Análisis de efectos principales del proceso de hidrólisis en la variable índice de acidez. (Elaboración propia)

De modo que, para minimizar costos y tiempo en el proceso de hidrólisis ácida, los niveles de concentración 0.5 N y tiempo de 1 hora parecen ser los más adecuados en términos generales. Estos valores, no solo reducirían costos de reactivos y energía, sino que también producen almidones con propiedades funcionales balanceadas, conservando una buena viscosidad, temperatura de gelatinización y absorción de agua adecuados para aplicaciones industriales.

5.2.2 Fosfatación

La figura 15 muestra el efecto frente a los parámetros de concentración de reactivo y tiempo de reacción para la viscosidad del almidón fosfatado. La viscosidad se ve disminuida por el aumento de la concentración y tiempo de reacción más bajo. En términos de costos y eficiencia, una menor viscosidad puede ser favorable si facilita el manejo y procesamiento del almidón. Así, una concentración alta y tiempo bajo parecen óptimos para reducir esta propiedad.

En cuanto a la temperatura de gelatinización, esta aumenta con la concentración y disminuye con el tiempo (figura 16). Una mayor TG puede mejorar la estabilidad térmica del almidón, lo cual es favorable para determinadas aplicaciones (Sandhu, Singh, & Lim, 2007). Si se requiere estabilidad, la combinación de una concentración alta y un tiempo bajo podría ser ventajosa.

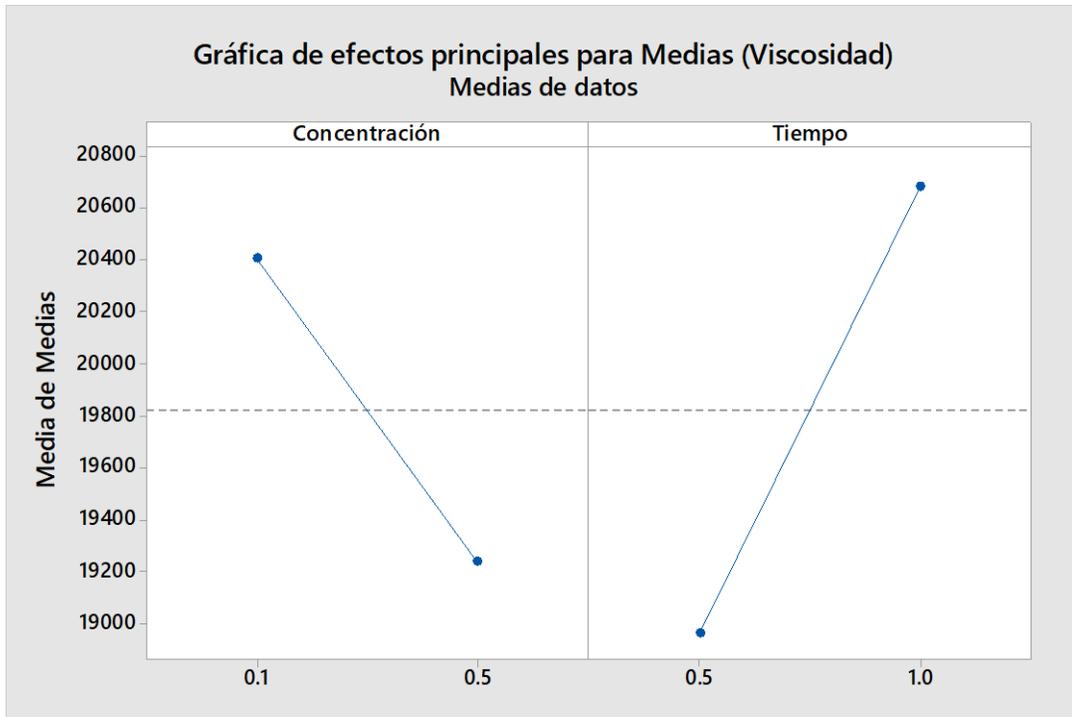


Figura 15: Análisis de efectos principales del proceso de fosfatación en la variable viscosidad. (Elaboración propia)

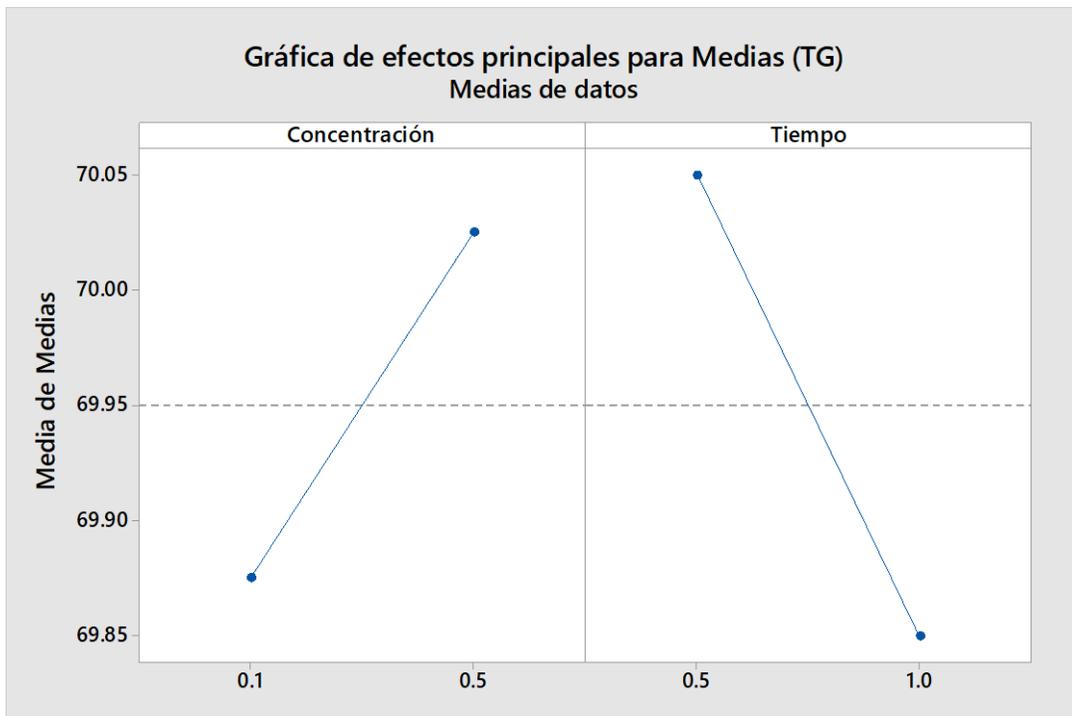


Figura 16: Análisis de efectos principales del proceso de fosfatación en la variable temperatura de gelatinización. (Elaboración propia)

El ISA tiende a aumentar tanto con la concentración como con el tiempo, esto se ve reflejado en la figura 17. Un valor alto de esta variable podría indicar una buena funcionalidad para algunas aplicaciones. Por otro lado, el IAA (figura 18) aumenta con la concentración, mientras que el tiempo, según el gráfico, parece tener poca incidencia sobre el mismo. Si la absorción de agua es un objetivo deseable, una concentración alta parece ser favorable.

Finalmente, el índice de acidez se incrementa con la concentración y el tiempo (figura 19). Un alto índice de acidez podría afectar el sabor y estabilidad del producto en aplicaciones alimentarias, por lo que una concentración y tiempo bajos podrían ser beneficiosos. Dado que se busca minimizar costos y optimizar la eficiencia del proceso, se recomienda realizar el proceso de modificación por fosfatación con una concentración baja de 0.1% p/p y un tiempo de reacción de 1 hora. Bajo estas condiciones, se debería mantener un equilibrio en la reducción de viscosidad. Además, se evitaría un incremento excesivo en el índice de acidez y se lograría un índice de absorción de agua adecuado sin sobrepasar la solubilidad en agua.

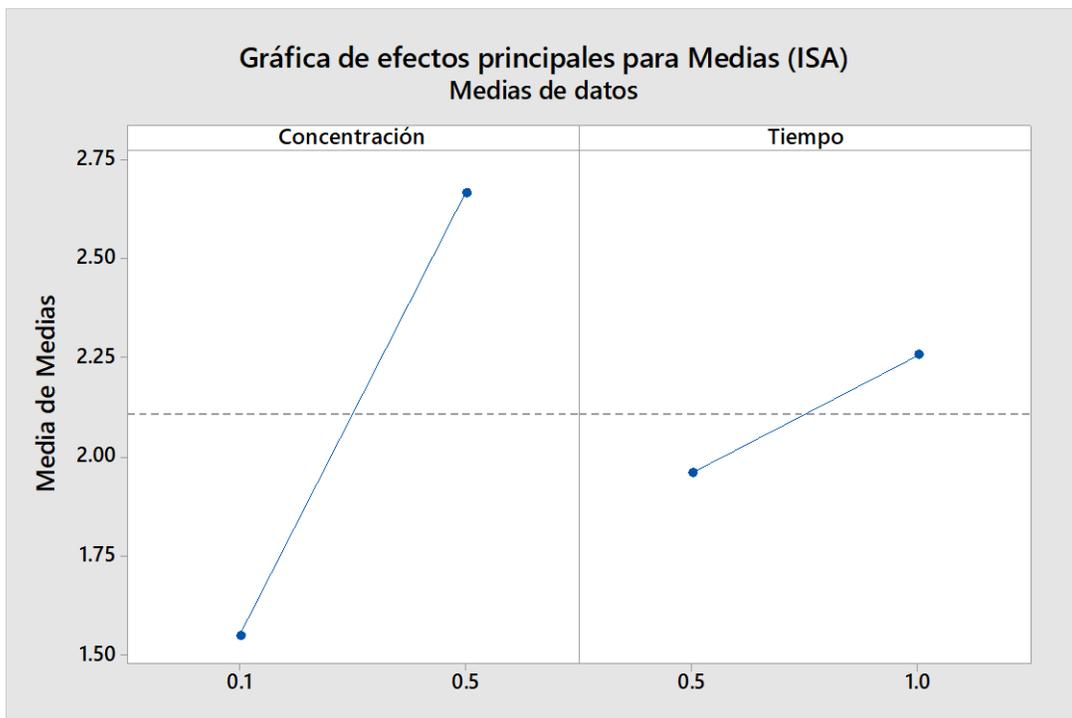


Figura 17: Análisis de efectos principales del proceso de fosfatación en la variable ISA. (Elaboración propia)

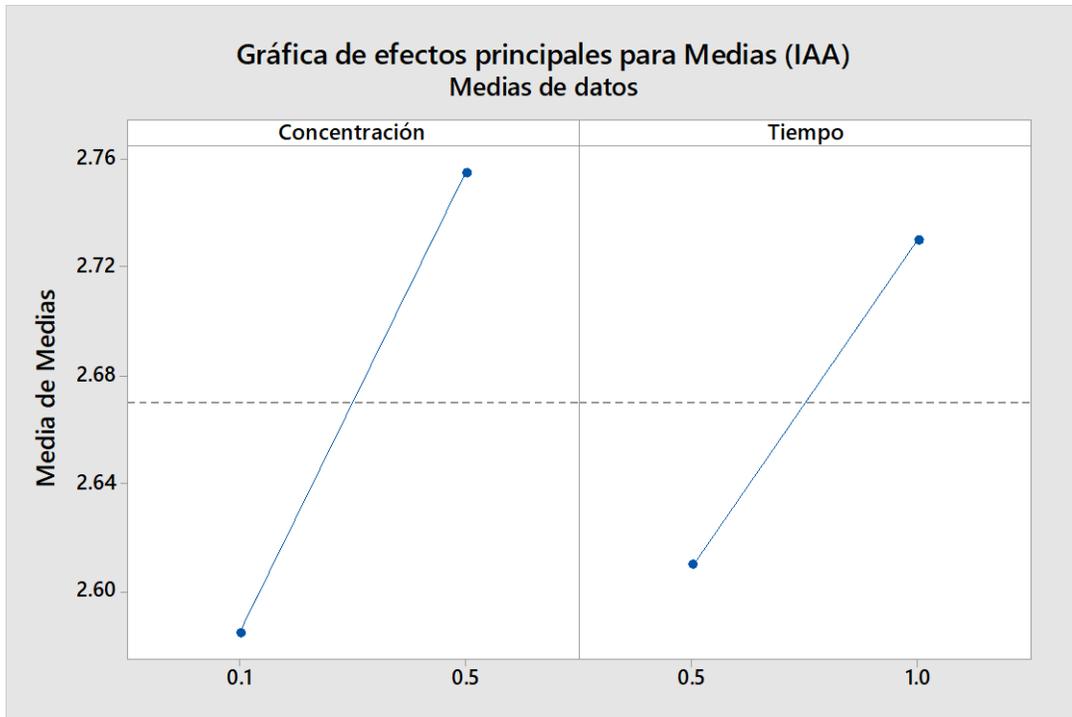


Figura 18: Análisis de efectos principales del proceso de fosfatación en la variable IAA. (Elaboración propia)

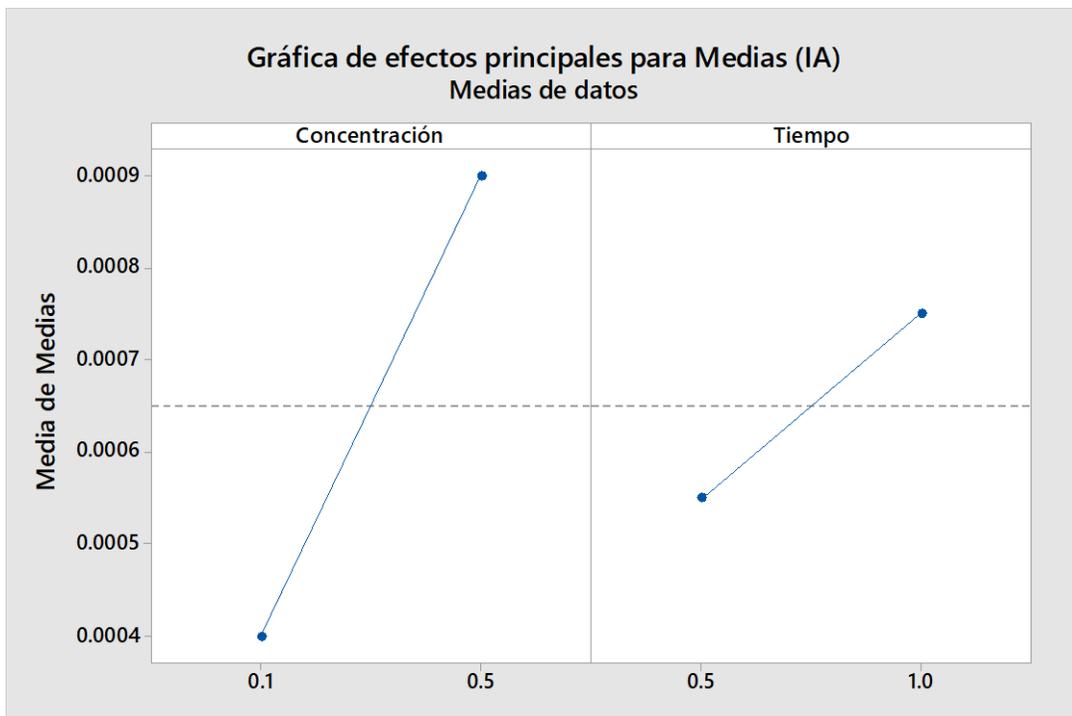


Figura 19: Análisis de efectos principales del proceso de fosfatación en la variable índice de acidez. (Elaboración propia)

5.3 Características fisicoquímicas y funcionales del almidón nativo de yuca y almidón modificado de yuca ante procesos de hidrólisis ácida y fosfatación

En esta sección, se analizan las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón nativo y modificado sometidos a los procesos de hidrólisis ácida y fosfatación, con el objetivo de identificar las diferencias que resultan de los métodos aplicados. Los resultados obtenidos permiten evaluar el impacto de cada proceso en el almidón y sus propiedades.

La caracterización realizada incluyó la medición de cinco propiedades, las cuales se presentan en la tabla 10 para cada vía de modificación, reflejando los valores promediados de acuerdo a las réplicas realizadas por tratamiento (Ver en la tabla 1.7 de anexos I la tabla completa de los resultados duplicados).

Tabla 10: Valores promedios obtenidos para las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón nativo y modificados por medio de Hidrólisis ácida y Fosfatación.

N	Parámetro/ Tratamiento	Viscosidad (mPa.s)	Temperatura de gelatinización (°C)	ISA %	IAA (g agua/g almidón)	Índice de acidez (meq/g almidón)
1	Nativo	21 462.5	67	0.5	3.96	0.0005
2	T1-H	542	70.2	3.46	2.25	0.0003
3	T2-H	200	69.55	2.21	1.95	0.0002
4	T3-H	99.1	69.9	2.58	1.90	0.0002
5	T4-H	33.25	70.15	2.27	1.86	0.0002
6	T1-F	18 460	70.2	1.35	2.46	0.0004
7	T2-F	22 355	69.55	1.75	2.71	0.0004
8	T3-F	19 470	69.9	2.57	2.76	0.0007
9	T4-F	19 010	70.15	2.76	2.75	0.0011

Fuente: Elaboración propia

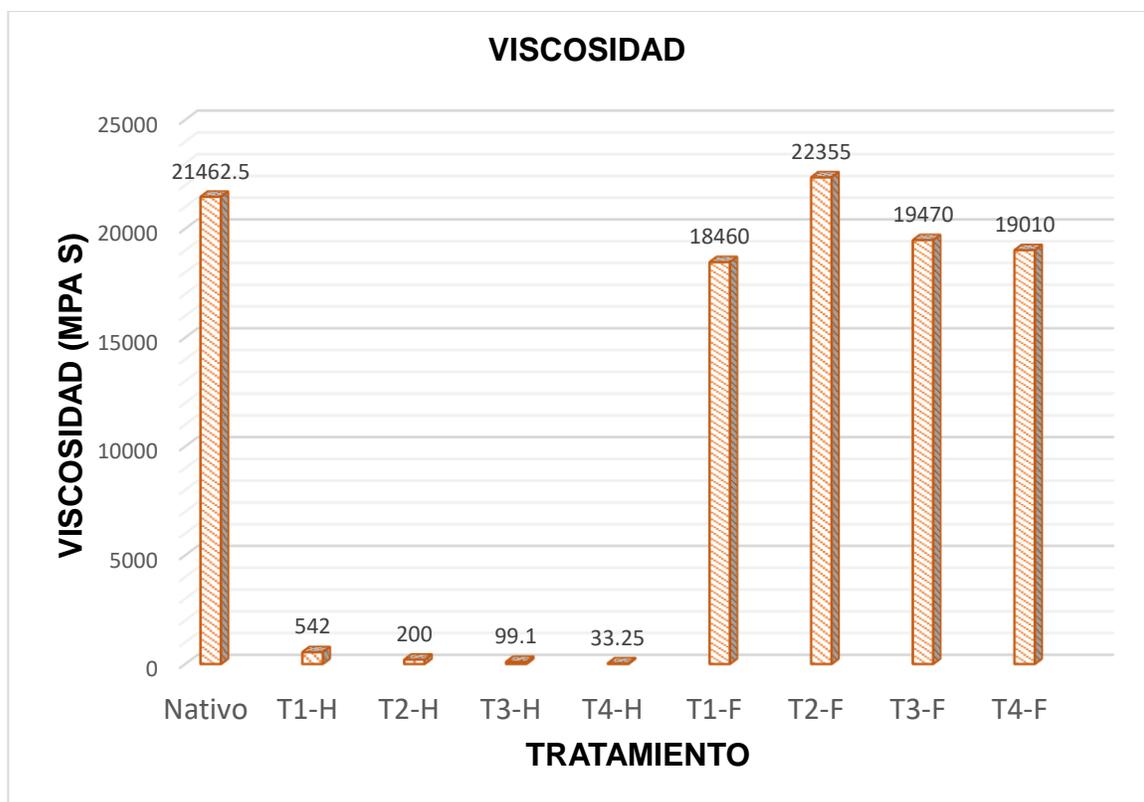


Figura 20: Efecto de los procesos de modificación en la viscosidad del almidón nativo. (Elaboración propia)

Los resultados obtenidos, proyectados mediante gráficos de barra, muestran claramente que la modificación química por hidrólisis ácida y fosfatación tuvieron un impacto significativo en las propiedades del almidón.

La viscosidad de los almidones sometidos a hidrólisis ácida varió entre 542 y 33.25 mPa·s, mostrando una disminución notable en comparación con el almidón nativo, cuya viscosidad fue de 21 461.5 mPa·s (figura 20). Este comportamiento concuerda con lo reportado en la literatura, que indica que la hidrólisis ácida degrada las moléculas de almidón, reduciendo su capacidad de retener agua y formar geles viscosos (Wang & Copeland, 2006).

Es evidente que, en los tratamientos más intensos, como el T4-H, se observa una disminución aún más pronunciada de la viscosidad respecto al almidón nativo. Este cambio en el comportamiento reológico de las soluciones tratadas se aprecia con mayor claridad en la figura 21, la cual agrupa los cuatro viscoamilogramas presentados en los anexos IV, facilitando una mejor comprensión de las diferencias entre ellos. Cada tratamiento en el gráfico representa diferentes condiciones de operación. T1-H y T2-H corresponden a una concentración de 0.5 N con tiempos de 1 y 2 horas, respectivamente. Los tratamientos T3-H y T4-H se realizaron a una concentración de 1 N, también con tiempos de 1 y 2 horas, respectivamente.

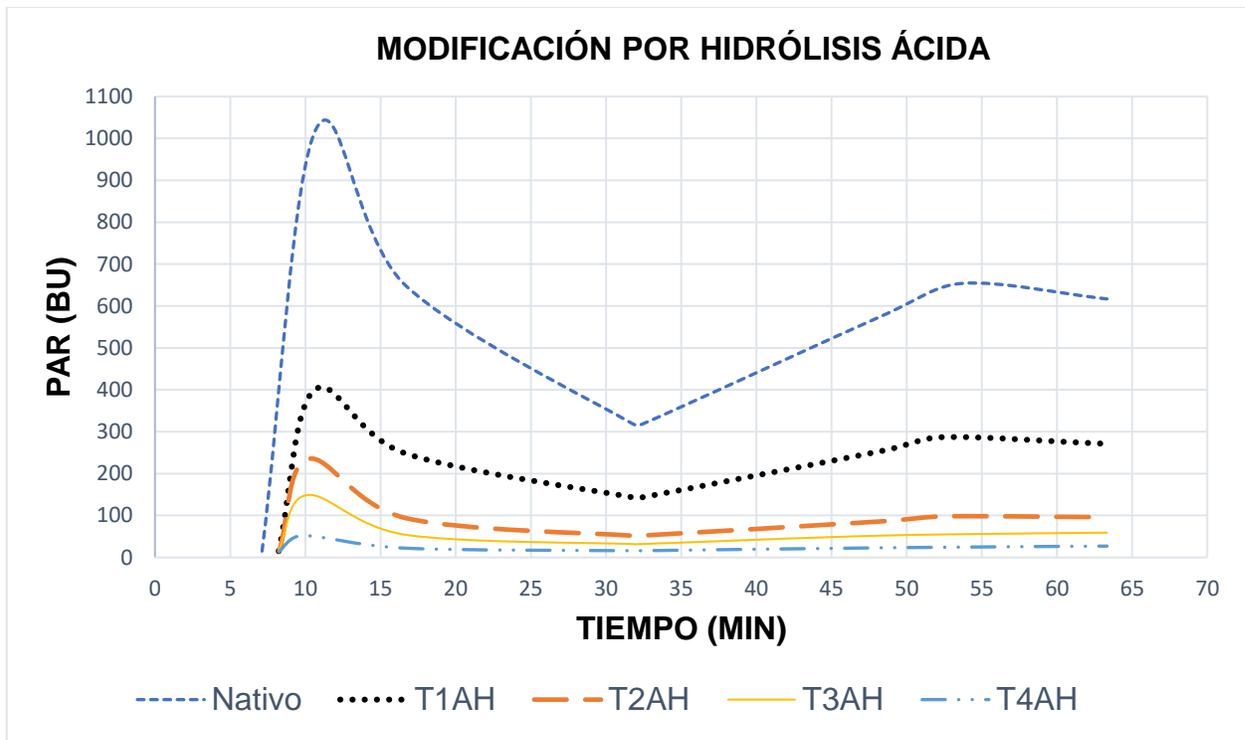


Figura 21: Viscoamilogramas de almidones modificados por hidrólisis ácida. (Elaboración propia)

Por otro lado, la viscosidad de los almidones fosfatados también fue menor en comparación con el almidón nativo. Los almidones tratados mostraron viscosidades que oscilaron entre 18 460 y 19 410 mPa·s. Este comportamiento concuerda con lo observado en el estudio de Arrieta & Pérez Sira (1996) en almidón de yuca modificado, y en el trabajo de Vargas et al. (2019), quienes reportaron una tendencia similar en almidón de arroz.

La reducción en la viscosidad se atribuye a la reticulación inducida por el TPS, que provoca un mayor entrecruzamiento en las cadenas de almidón, lo que aumenta su resistencia a la hinchazón y disminuye la capacidad de formar geles viscosos. Según Ansuí y Seib (1993), citado por Arrieta & Pérez Sira (1996), esta disminución puede ser consecuencia del incremento en el grado de asociación intermolecular, que limita la capacidad de absorción de agua y, en consecuencia, reduce la viscosidad.

Los valores de viscosidad relativamente similares entre los tratamientos T1-F a T4-F y el comportamiento de la pasta reflejado en los viscoamilogramas de la figura 22 sugieren que las variaciones en la concentración de reactivo y el tiempo de tratamiento tuvieron un impacto moderado en la viscosidad final. Cada tratamiento en el gráfico representa diferentes condiciones de operación. T1-F y T2-F corresponden a una concentración de 0.1% con tiempos de 0.5 y 1 horas, respectivamente. Los tratamientos T3-F y T4-F se realizaron a una concentración de 0.5%, también con tiempos de 0.5 y 1 horas, respectivamente.

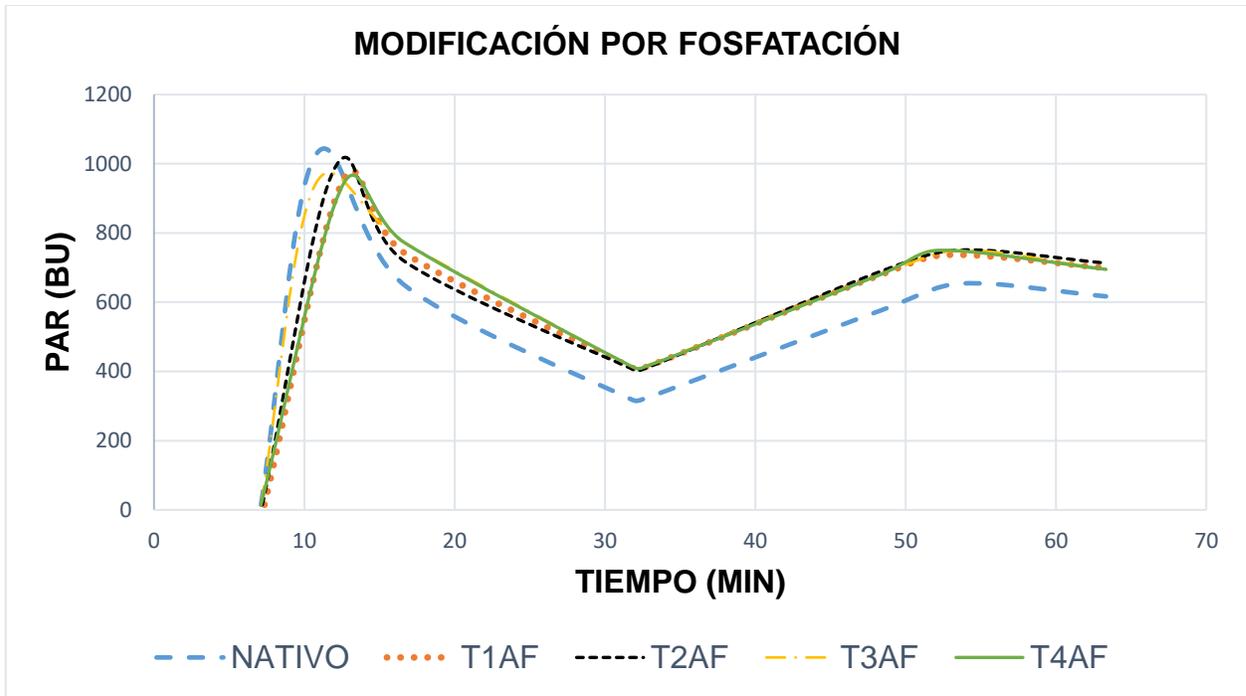


Figura 22: Viscoamilogramas de almidones modificados por fosfatación. (Elaboración propia)

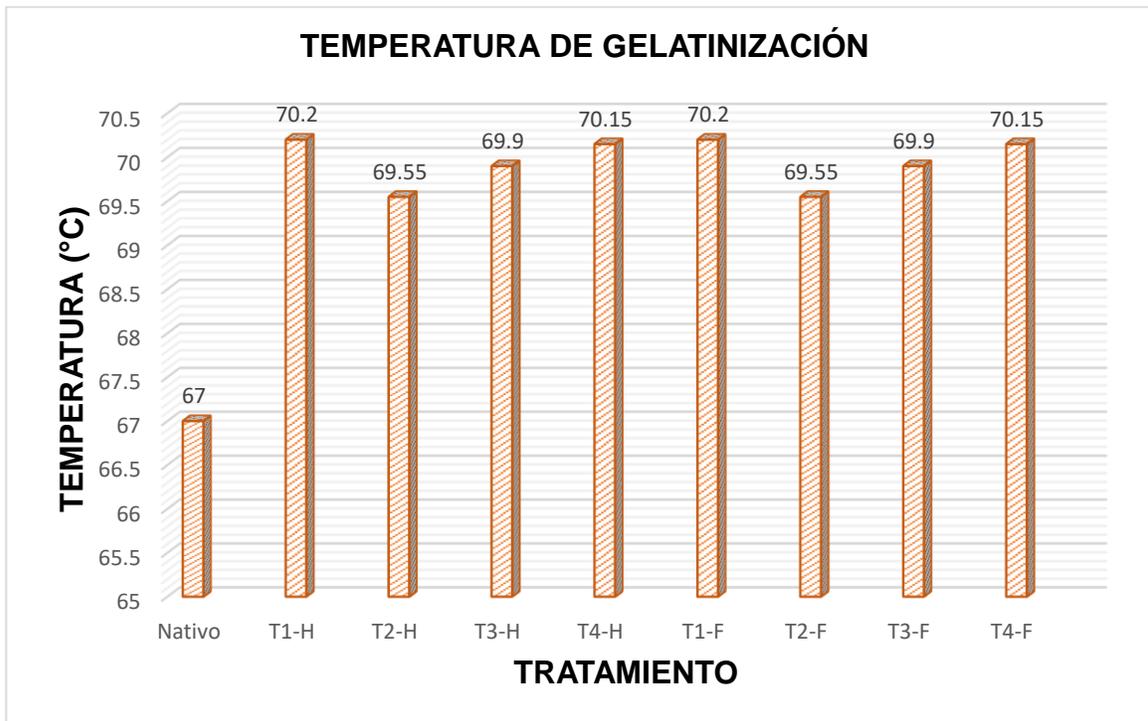


Figura 23: Efecto de los procesos de modificación en la temperatura de gelatinización del almidón nativo. (Elaboración propia)

La figura 23 refleja el comportamiento de la temperatura de gelatinización (TG), esta aumentó en todos los tratamientos en comparación con el almidón nativo, que tiene una TG de 67 °C. Este aumento, que alcanza un máximo de 70.2 °C, sugiere que la estructura del almidón ha sufrido modificaciones, requiriendo mayor energía para iniciar la gelatinización.

Según Wang y Copeland (2006), para el caso de los almidones hidrolizados, este incremento en la TG podría deberse a una disminución en el poder de hinchamiento, lo que retrasa el desarrollo de la viscosidad. Un comportamiento similar fue reportado por Salcedo et al., (2017), quienes observaron un aumento en la TG de almidones de yuca sometidos a tratamientos de hidrólisis, incluso bajo condiciones de mayor concentración de ácido (0.63 M) y tiempos de reacción prolongados (10 horas). Esto se debe, en parte, al bajo contenido de amilosa en la yuca y a su estructura más ramificada, lo que permite que la reacción de hidrólisis incremente la cristalinidad y la densidad de los enlaces de hidrógeno, elevando así la TG (Wang & Wang, 2001).

En cuanto a los almidones modificados con TPS. El incremento puede atribuirse al efecto de la reticulación, que refuerza las interacciones entre las cadenas de polisacáridos, aumentando la estabilidad estructural y, por lo tanto, requiriendo más energía para romper estos enlaces y permitir la gelatinización (Wurzburg, 1986).

Para el comportamiento del ISA e IAA de los almidones tratados versus el nativo, se muestra la figura 24 a continuación.

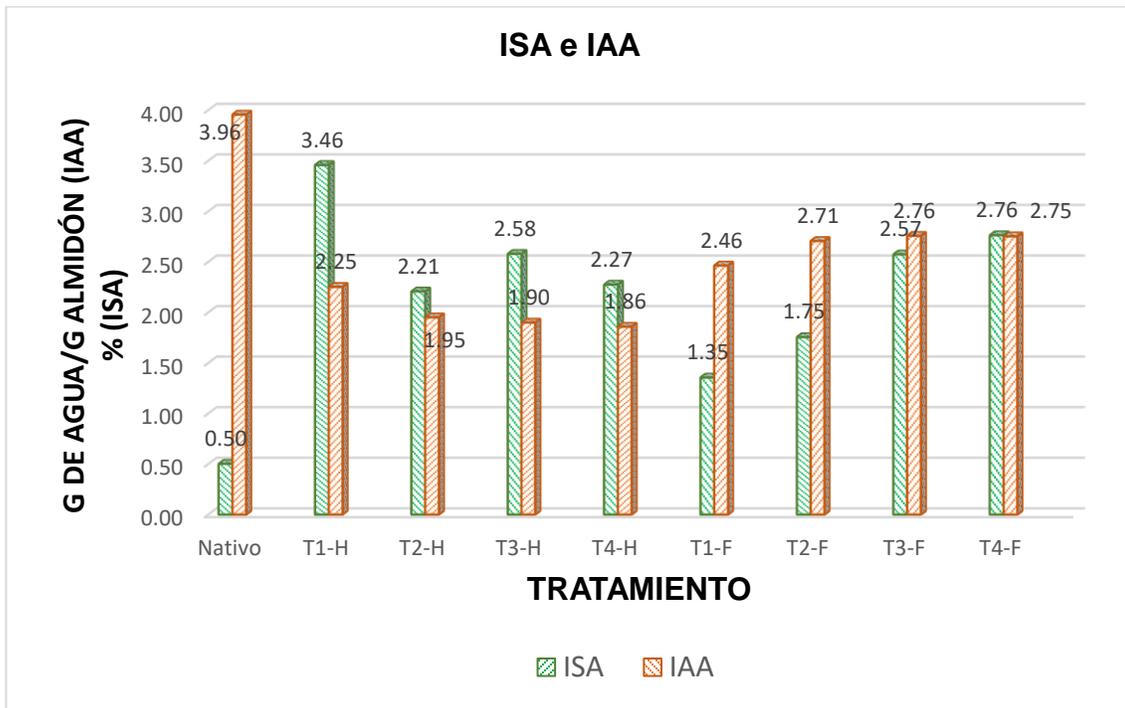


Figura 24: Efecto de los procesos de modificación en el ISA e IAA del almidón nativo. (Elaboración propia)

El ISA en los almidones hidrolizados varió entre 3.46 y 2.21% (g/100g de muestra) siendo valores cercanos a los reportados por Salcedo et al., (2017) en almidones linternizados de yuca y ñame. En contraste, el almidón nativo presentó un ISA de 0.5%, lo que indica que la modificación por hidrólisis ácida incrementa significativamente la solubilidad del almidón. Se ha identificado un aumento en la solubilidad de almidones hidrolizados tratados con HCL en almidones de maíz ceroso, pinhão y plátano (Aparicio et al., 2015; Thys et al., 2013; Sandhu et al., 2007). Este aumento probablemente se deba a la formación de fracciones lineales de bajo peso molecular con el posterior incremento de grupos hidroxilos, los cuales tienen la capacidad para retener las moléculas de agua por medio de enlaces de hidrógeno, facilitando la solubilidad de los gránulos en agua (Sandhu et al., 2007).

El ISA en los almidones fosfatados osciló entre 1.35 y 2.36%, lo que indica que la fosfatación de igual forma incrementa ligeramente la solubilidad en agua en comparación con el valor obtenido para el almidón nativo de 0.5%. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Vargas et al. (2019) en almidón de arroz. Sitohy y Ramadan, (2000) obtuvieron almidones fosfatados de maíz, arroz y patata con diferentes grados de sustitución. Establecieron que se obtienen almidones muy solubles en agua con grados bajos de sustitución. Atribuyeron este efecto precisamente a la repulsión entre la carga negativa de los grupos fosfato de la molécula de almidón, que reduce las fuerzas de atracción intermoleculares. Un aumento posterior del grado de sustitución podría disminuir la solubilidad por la formación de enlaces cruzados entre polímeros de almidón.

Para el IAA de almidones hidrolizados se obtuvieron valores entre 2.25 y 1.86 g de agua/g de almidón, lo que evidencia el efecto de la hidrólisis ácida en la disminución de esta propiedad en comparación con el valor reportado para el almidón nativo de 3.96. Este comportamiento es similar a los registrados por Salcedo et al., (2017), Orolunsola et al., (2011) y Sandhu et al., (2007) quienes reportaron una disminución en el IAA en almidones de yuca, ñame, batata y maíz respectivamente. La reducción del IAA está vinculada a la pérdida del material amorfo, lo cual se refleja en el aumento de la región cristalina.

En cuanto al IAA de los almidones fosfatados, los resultados obtenidos fueron inferiores a los del almidón nativo, caso contrario a lo reportado por Vargas et al. (2019). Esta discrepancia podría atribuirse principalmente a la diferencia en el tipo de almidón utilizado, ya que en su caso se trabajó con almidón de arroz. Además, dicho almidón fue sometido previamente a una modificación mediante hidrólisis ácida antes de realizar la fosfatación, empleando concentraciones más altas que las utilizadas en esta investigación. Según Wurzburg, (1986) la fosforilación puede alterar la estructura molecular del almidón, afectando la disposición de las cadenas de amilosa y amilopectina. Esto puede reducir la capacidad del almidón para retener agua, ya que la estructura más compacta y menos ramificada puede limitar los sitios disponibles para la interacción con el agua.

Finalmente, el índice de acidez de los almidones modificados por hidrólisis presentó una disminución en comparación con el almidón nativo (figura 25), cuyo valor fue de 0.0005 meq/g, mientras que los almidones sometidos a hidrólisis mostraron valores

entre 0.0003 y 0.0002 meq/g. Esta tendencia puede explicarse por los efectos de la hidrólisis ácida, la cual fragmenta las cadenas de amilosa y amilopectina, generando productos de menor peso molecular. Al degradarse las macromoléculas del almidón, disminuye la cantidad de grupos funcionales susceptibles a la acidificación, lo que se traduce en un menor índice de acidez (Wang & Copeland, 2006).

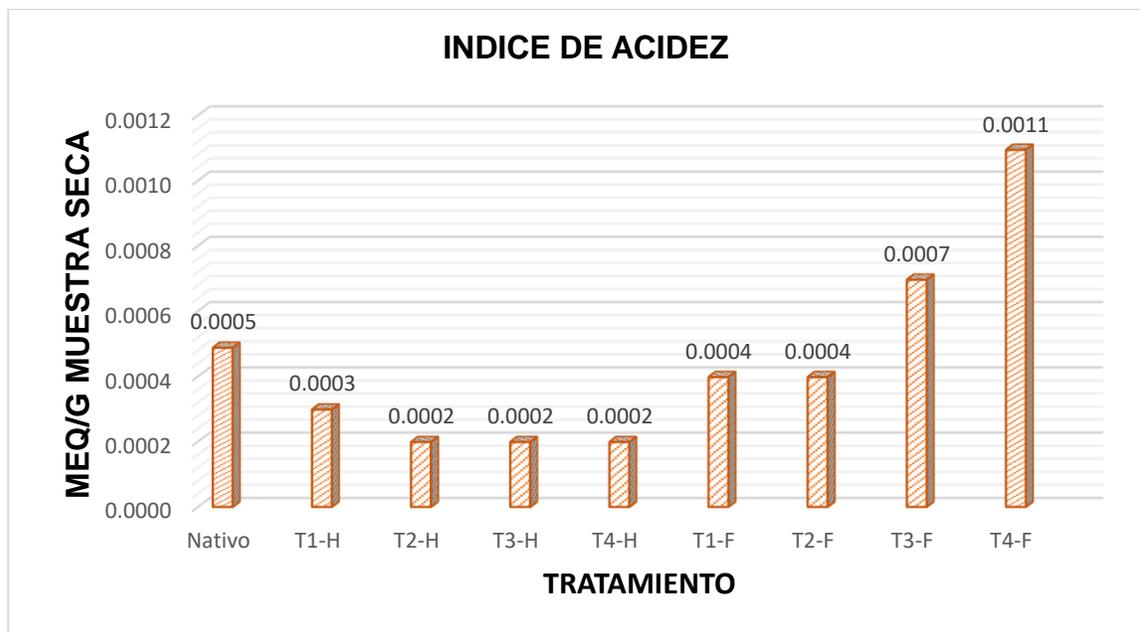


Figura 25: Efecto de los procesos de modificación en el índice de acidez del almidón nativo. (Elaboración propia)

Por otro lado, el índice de acidez en los almidones fosfatados mostró un aumento significativo en comparación con el almidón nativo e hidrolizado. Los almidones modificados por esta vía alcanzaron valores de hasta 0.0011 meq/g (T4-F). Este aumento puede atribuirse a la incorporación de grupos fosfato del TPS en la estructura del almidón, los cuales incrementan la cantidad de grupos ácidos en la muestra. Además, este efecto es más notable en los tratamientos con mayor concentración de TPS y mayor tiempo de exposición (T4-F), lo que sugiere que el grado de modificación es directamente proporcional al incremento del índice de acidez

VI. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica del almidón industrial de yuca nativo mostró una viscosidad promedio de 21 225 mPa·s, una temperatura de gelatinización de 67 °C, un Índice de Solubilidad en Agua (ISA) de 0.50%, un Índice de Absorción de Agua (IAA) de 3.96% y un índice de acidez de 0.0005 meq/g. Estos valores, en su mayoría, se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura, con excepción de la viscosidad y el índice de acidez, que presentaron diferencias significativas.

El análisis gráfico de efectos principales reveló que las condiciones más óptimas para llevar a cabo las modificaciones corresponde a 0.5 N de HCl y 1 hora para el proceso de hidrólisis ácida y de 0.1% (p/p) de Tripolifosfato de sodio y 1 hora para el proceso de fosfatación. Estas condiciones no solo optimizan las propiedades funcionales del almidón modificado, sino que también presentan una opción económicamente viable al reducir costos de reactivo y tiempo de procesamiento.

El almidón de yuca hidrolizado presentó temperaturas de gelatinización entre 69.55 °C y 70.5 °C, mayores que las del almidón nativo (67 °C), una baja viscosidad de la pasta en caliente, con valores que oscilaron entre 33.25 mPa·s y 542 mPa·s, y pastas ligeramente más amarillentas. Además, mostró una disminución significativa del índice de acidez, con valores entre 0.0002 meq/g y 0.0003 meq/g, y del índice de absorción de agua, que se redujo hasta 1.90 g agua/g almidón, mientras que el índice de solubilidad aumentó, alcanzando hasta 3.46%.

El proceso de fosfatación tuvo poca incidencia en la disminución de la viscosidad del almidón, manteniéndose en un rango de 18 460.0 mPa·s a 22 355.0 mPa·s. Sin embargo, este proceso aumentó hasta en un 8% la temperatura de gelatinización, reportando valores entre 69.9 °C y 70.15 °C. Hubo incidencia moderada en las propiedades de solubilidad y absorción, con incrementos del índice de solubilidad de hasta 2.76% y disminuciones del índice de absorción de agua hasta 2.46 g agua/g almidón.

VII. RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos, se recomienda ampliar el número de niveles de concentración del agente fosfatante y del ácido utilizado en la hidrólisis, así como explorar tiempos de reacción más prolongados. La evaluación de al menos tres concentraciones, combinada con el análisis de tiempos extendidos, permitirá un estudio más detallado del impacto de estos factores en las propiedades funcionales del almidón modificado. Este enfoque puede revelar tendencias no lineales o efectos específicos en propiedades como la viscosidad, la solubilidad y el comportamiento térmico del almidón, proporcionando una caracterización más completa y robusta para su posible aplicación industrial.
- Adicionalmente, se recomienda explorar el impacto de la temperatura en ambos métodos de modificación, para el caso de la hidrólisis ácida, valores entre 40 y 60°C, y para la fosfatación valores más altos al utilizado en esta investigación, como lo sugiere Wurzburg, (1986) en un rango entre 100-130°C, ya que variaciones controladas de temperatura permitirían evaluar su influencia en las propiedades del almidón modificado obtenido. Esto contribuiría a identificar las condiciones térmicas óptimas para cada tipo de modificación, lo que podría resultar en almidones con propiedades específicas ajustadas a las necesidades de aplicaciones industriales.
- Evaluar el uso de otros agentes fosfatantes además del tripolifosfato de sodio.
- Incluir la determinación del grado de sustitución (GS) en estudios futuros sobre la modificación de almidones por fosfatación. Esta medida es crucial para evaluar la cantidad de grupos fosfato incorporados en la estructura del almidón y su impacto en las propiedades funcionales. Aunque en este estudio no se pudo realizar debido a limitaciones de recursos y equipos, la determinación del GS permitiría garantizar que el almidón modificado cumpla con los requisitos para aplicaciones industriales.
- Recomendamos a la universidad implementar una línea de investigación específica dentro del área de alimentos, enfocada en el estudio y desarrollo de carbohidratos, con énfasis en almidones modificados. Esta iniciativa no solo fomentaría la innovación en un campo de alto impacto industrial y académico, sino que también permitiría la formación de estudiantes e investigadores especializados. Para ello sería ideal que se gestionen instrumentos y equipos necesarios para llevar a cabo investigaciones más avanzadas, fortaleciendo la generación de conocimiento científico y tecnológico, y promoviendo una mayor vinculación entre la academia, la industria y la sociedad.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Alvis, A., Velez, C., Villada, H., & Rada-Mendoza, M. (2008). Análisis Físico-Químico y Morfológico de Almidones de Ñame, Yuca y Papa y Determinación de la Viscosidad de las Pastas. *Scielo*, 19(1), 19-28. doi:10.4067/S0718-07642008000100004
- Amani, N. G., Kamenan, A., & Rolland-Sabaté, A. (2005). Stability of yam starch gels during processing. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*, 4(1), 94-101. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/27797233_Stability_of_yam_starch_gels_during_processing
- Aparicio, A., Zaragoza, M., Perucini, A., Páramo, D., Aguirre, C., Ramirez, H., & Bello, P. (2015). Lintnerization of banana starch isolated from underutilized variety: morphological, thermal, functional properties, and digestibility. *CyTA - Journal of Food*, 13(1), 3-9.
- Arias, M. A. (SF de Agosto de 2017). *Aprovechamiento de almidón de amaranto (A.hypochondriacus) como almidón resistente*. Obtenido de [Tesis para obtener el grado de Maestra en Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana]: https://www.academia.edu/86034043/Aprovechamiento_de_almid%C3%B3n_de_amaranto_A_hypochondriacus_como_almid%C3%B3n_resistente
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO.
- Arrieta, P., & Pérez Sira, E. (January de 1996). *Preparación y caracterización fisico-química y reológica de almidones de yuca modificados químicamente por fosfatación, acetilación y doble derivación*. Obtenido de Conferencia Internacional: ALMIDON. Propiedades Físico-químicas, Funcionales y Nutrición: https://www.researchgate.net/publication/230814357_Preparacion_y_caracterizacion_fisico-quimica_y_reologica_de_almidones_de_yuca_modificados_quimicamente_por_fosfatacion_acetilacion_y_doble_derivacion
- Atichokudomchai, N., Shobsngob, S., & Varavinit, S. (2000). Morphological Properties of Acid-modified Tapioca Starch. *Starch-Stärke*, 52(8-9), 283-289. doi:10.1002/1521-379x(20009)52:8/9<283::aid-star283>3.0.co;2-q
- Avellán, J. (Noviembre de 2016). Producción y comercialización de yuca en la comunidad Las Flores del departamento de Masaya. Managua, Nicaragua.
- Badui, S. (1993). *Química de los Alimentos*. Mexico: Editorial Alhambra Mexicana.
- Belitz, H., & Grosch, W. (2012). *Química de los alimentos*. España, Zaragoza: Editorial Acribia.

- Bemiller, J. N. (1997). Starch Modification: Challenges and Prospects. *Starch-starke*, 49(4), 127-131. doi:10.1002/star.19970490402
- Benoit, M., & Fonteyn, D. (25 de Julio de 2012). *ES2727940T3-Almidón de endurecimiento rápido en gomas de almidón*. Obtenido de Google Patents : <https://patents.google.com/patent/ES2727940T3/es>
- Beyer , H., Barluenga, J., & Walter , W. (1987). *Manual de Química Orgánica*. Editorial Reverté.
- Biliaderis, C. G. (1982). Physical characteristics, enzymic digestibility and structure of chemically modified smooth pea and waxy maize starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30(5), 925-930. doi:10.1021/jf00113a029
- Biliaderis, C. G. (1991). Non-equilibrium phase transition of aqueous starch systems. Nueva York, EUA.
- Boruch, M. (1985). The transformation of potato starch during oxidation with hypochlorite. *Starch / Stärke*, 37(3), 91-98. doi:10.1002/star.19850370306
- Cheftel, H., Cheftel , J., & Besancon , P. (1980). *Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos* (Vol. 1). Editorial Acribia.
- Chen, P., Xie, F., Zhao, L., Qiao, Q., & Liu, X. (2017). Effect of acid hydrolysis on the multi-scale structure change of starch with different amylose content. *Food Hydrocolloids*, 69, 359-368. doi:10.1016/j.foodhyd.2017.03.003
- Cock, J. H. (1989). *La yuca, nuevo potencial para un cultivo tradicional*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Coultate, P. (1998). *Química y bioquímica de Alimentos*. Editorial Acribia.
- Cruz Benavidez, M. M., Rangel Vargas, E., Castro Rosas, J., Gómez Aldapa, C., & Fonseca Florido, H. A. (4 de Julio de 2017). *Propiedades fisicoquímicas y funcionales de mezclas de almidones de yuca (cerosa y normal), químicamente modificados y su posible aplicación como material pared*. doi:10.29057/icap.v3i6.2449
- Cruz Benitez, M. M., Vargas, E., Castro Rosas, J., Gómez Aldapa, V. C., & Fonseca Florida, H. (2010). *Propiedades fisicoquímicas y funcionales de mezclas de almidones de yuca (cerosa y normal), químicamente modificados y su posible aplicación como material pared*. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icap/article/download/2449/2458?inline=1>
- Dufresne, A., Thomas, S., & Pothan, L. A. (2013). *Biopolymer nanocomposites: Processing, properties and applications*. (I. John Wiley & Sons, Ed.) United States, New Jersey. doi:10.1002/9781118609958.ch16
- Eke-Ejiofor, J. (2015). FUNCTIONAL PROPERTIES OF STARCHES, PHYSICO-CHEMICAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF GLUCOSE SYRUP MADE FROM CASSAVA AND DIFFERENT POTATO VARIETIES. *International*

Journal of Recent Scientific Research, 6(6), 4400-4406. Obtenido de <http://www.recentscientific.com>

- Enríquez, M., Velasco, R., & Fernandez, A. (s.f.). Caracterización de almidones de yuca nativos y modificados para la elaboración de empaques biodegradables. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*.
- Farhat, I., Oguntona, T., & Neale, R. (1999). Characterisation of starches from West African yams. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2105-2112. Obtenido de [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199912\)79:15<2105::AID-JSFA510>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199912)79:15<2105::AID-JSFA510>3.0.CO;2-R)
- García , V., Colonna, P., Bouchet, B., & Gallant, D. (1997). Structural Changes of Cassava Starch Granules after Heating at Intermediate Water Contents. *Starch - Starke*, 49(5), 171-179. doi:10.1002/star.19970490502
- García Martínez, C. A., & Salmerón Vanegas, L. A. (2016). Estudio comparativo de la producción a escala de laboratorio de jarabe de glucosa por medio de la hidrólisis acida de almidón de yuca y almidón de papa. Nicaragua.
- Hao, Y., Chen, Y., Li, Q., & Gao, Q. (2017). Preparation of starch nanocrystals through enzymatic pretreatment from waxy potato starch. *Carbohydrate Polymers*, 184, 171-177. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.12.042
- Hermansson, A.-M., & Svegmarm, K. (1996). Developments in the understanding of starch functionality. *Trends in Food Science and Technology*, 7(11), 345-353. doi:10.1016/S0924-2244(96)10036-4
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J. G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Food Science and Technology*, 28(3), 718-726. doi:<https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>
- Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. *Carbohydrate polymers* 45,, 45, 253-267.
- Howling , D. (1980). THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF STARCH ON ITS RHEOLOGICAL PROPERTIES. *Food Chemistry*, 6(1), 51-61. doi:10.1016/0308-8146(80)90006-0
- Huber, K. C., & BeMiller, J. N. (2001). Location of Sites of Reaction Within Starch Granules. *Cereal chemistry*, 78(2), 173-180. doi:10.1094/cchem.2001.78.2.173
- Hwang, J., & Kokini, I. (1992). Contribution of the side branches to rheological properties of pectins. *Carbohydrate Polymers*, 19(1), 41-50. doi:10.1016/0144-8617(92)90053-S
- Ibañes, F., Torre, P., & Irigoyen, A. (2002). *Aditivos alimenticios*. Obtenido de Ediciones multiprensa: https://www.academia.edu/9076426/ADITIVOS_ALIMENTARIOS

- Jenkins, P. J., & Donald, A. M. (1997). The Effect of Acid Hydrolysis on Native Starch Granule Structure. *Starch-stärke*, 49(7-8), 262-267. doi:10.1002/star.19970490703
- Jiménez, E., & Martínez, S. (2016). *Obtención y caracterización física y química de la yuca (Manihot esculentum) variedad guayape*. Lambayeque, Perú: Universidad Nacional "Pedro Ruíz Gallo".
- Jury, A., Armada, M., Margalef, M., & Corimayo, J. (1994). Producción, caracterización y aplicaciones en alimentos de almidones modificados de maíz. *Información Tecnológica*, 5(1), 43-50.
- Kaur, L., Singh, N., & Singh, J. (2004). Factors influencing the properties of hydroxypropylated potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 55(2), 211-223. doi:10.1016/j.carbpol.2003.09.011
- Kim, H., Muhrbeck, P., & Eliasson, A. (2007). Changes in rheological properties of hydroxypropyl potato starch pastes during freeze-thaw treatments II. Effect of molar substitution and cross-linking. *Journal of Texture Studies*, 24(2), 199-213. doi:10.1111/j.1745-4603.1993.tb00044.x
- Lawal, O. (2004). Composition, physicochemical properties and retrogradation characteristics of native, oxidised, acetylated and acid-thinned new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *Food Chemistry*, 87(2), 205-218. doi:10.1016/j.foodchem.2003.11.013
- León Méndez, G., León Méndez, D., Monroy Arellano, M. R., Angarita, S. D., & Herrera Barros, A. (9 de Julio de 2020). Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética. *Archivos Venezolanos de Farmacología Clínica y Terapéutica*, 39(5), 620-626. doi:10.5281/zenodo.4263365
- Light, M. (1990). Modified food starches: Why, what, where and how. *Cereal Food World*, 35(11), 1082-1092.
- Lim, S., & Seib, A. (1993). Preparation and Pasting Properties of Wheat and Corn Starch Phosphates. *Cereal Chemistry*, 70(2), 137-144. Obtenido de https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1993/Documents/70_137.pdf
- Lindeboom, N., Chang, P., & Tyler, R. (2004). Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch/Stärke*, 56(3-4), 89-99. doi:10.1002/star.200300218
- Lisi, M. S. (2012). Caracterización de almidones de Maíz: nativo y modificados. Tucumán.
- Liu, H., Ramden, L., & Corke, H. (1999). Physical properties and enzymatic digestibility of hydroxypropylated and normal maize starch. *Carbohydrate Polymers*, 51, 213-221.

- Liu, H., Ramsden, L., & Corke, H. (1998). Physical properties of cross-linked and acetylated normal and waxy rice starch. *Starch*, 51(7), 249-252. Obtenido de https://www.academia.edu/3064546/Physical_Properties_of_Cross_linked_and_Acetylated_Normal_and_Waxy_Rice_Starch
- Liu, Q. (2005). Understanding Starches and Their Role in Food. In "Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications". *Taylor and Francis Group LLC*, 311-349.
- López, P. G. (Agosto de 2013). Obtención de productos directamente expandidos por extrusión y botanas de 3a generación a base de chía y almidón de maíz resistente AR4. Xalapa, Veracruz, Mexico.
- Maliczyszyn, W., Bindzus, W., & Altieri, P. A. (7 de agosto de 2000). *ES2187271B2 - Combinaciones de polimeros de almidon usados en la fabricacion de papel.* . Obtenido de - Google Patents.: <https://patents.google.com/patent/ES2187271B2/es>
- Malin, S., & Nilsson, L. (2018). Starch in food: Structure, function and applications. Langford, Kidlington, United Kingdom.
- Manatsathit, W. (1983). The Influence of Molar Substitution on the Water Binding Capacity of Hydroxypropyl Maize Starches. *Starch - Stärke*, 35(3), 92-94. doi:10.1002/star.19830350306
- Martínez, K. T. (2007). *Optimización de la etapa de hidrólisis ácida en el proceso de fosfatación de almidón por extrusión para la encapsulación de aceite esencial de naranja*. Obtenido de [Tesis para optar al Título de Licenciada en química en alimentos, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]: <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/10475>
- Marusic, M. A. (2022). Efecto de la Hidrólisis ácida sobre las propiedades de almidones obtenidos de dos variedades de papa amarga y Tunta. Lima, Perú. Obtenido de [Tesis de bachiller inédita]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- MEFCCA. (2022). *Cultivo de Yuca [Archivo PDF]*. Obtenido de <https://www.economiafamiliar.gob.ni/backend/vistas/doc/cartilla/documento5592489.pdf>
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Analisis de Experimentos*. Mexico: Editorial LIMUSA, S.A.
- Moorthy, N. (2002). Physicochemical and Functional Properties of Tropical Tuber Starches: A Review. *Starch/Stärke*, 559-592. doi:10.1002/1521-379x(200212)54:12<559::aid-star2222559>3.0.co;2-f
- Moreno, R. B., & Ramírez, A. M. (2014). *Análisis Instrumental*. Madrid: EDITORIAL SÍNTESIS, S.A.
- Najarro, M. C. (2009). Caracterización de almidón en papas nativas del grupo Solanum phureja. Lima, Perú.

- Niba , L., Bokanga, M., Jackson, F., Schlimme, D., & Li, B. (2002). Physicochemical Properties and Starch Granular characteristics of flour from various manihot esculenta (Cassava) genotypes. *Journal of Food Science*, 67(5), 1701-1705. doi:10.1111/j.1365-2621.2002.tb08709.x
- Orolunsola , E., Isah, A., & Allagh, T. (2011). Effects of varying conditions of acid hydrolysis on some physicochemical properties of Ipomoea batatas starch. *Nigerian Journal of Pharmaceutical Science*, 9(2), 73-80.
- Ospina, B., & Ceballos, H. (2002). *La yuca en el tercer milenio: sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización comercial y comercialización/compilado*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Patiño, C. A., & Toro, M. D. (2022). Porcentaje de acidez titulable y escala de pH. Colombia.
- Perera, C., & Hoover, R. (1999). Influence of hydroxypropylation on retrogradation properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starches. *Food Chemistry*, 64(3), 361-375. doi:10.1016/s0308-8146(98)00130-7
- Pinto, R. (1980). *Elaboración y usos del almidón de yuca*. ICA: Boletín técnico N66.
- Rodríguez, A. P. (2011). Obtención y caracterización de almidones modificados y su aplicación como agentes encapsulantes del bioinsecticida Bacillus thuringiensis. Santiago de Querétaro, Querétaro, México.
- Rodriguez, T., Banguela, S., & M´Boumba, R. (2014). Utilización de almidón fosfato en la elaboración de postres lácteos. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 24(1), 59-62. Obtenido de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad de Investigaciones para la Industria Alimentaria.
- Rogols, S. (1986). Starch modifications: a view into the future. *Cereal Food World*, 31, 869-874.
- Rojas, M. (2012). *Estudio de las características físicoquímicas de la yuca (Manihot esculenta Crantz) y sus efectos en la calidad de hojuelas fritas para su procesamiento en la empresa PRONAL SA*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Escuela de Química.
- Rutenberg, M. W., & Solarek, D. (1994). STARCH DERIVATIVES: PRODUCTION AND USES. En *Starch: Chemistry and Technology* (págs. 311-388). doi:10.1016/B978-0-12-746270-7.50016-1
- Salcedo Mendoza, J., Contreras Lozano, K. P., Figueroa Flores, J., Bohórquez Navarro , D. L., Rodriguez Lora, M., & Ascencio Galván , M. L. (2017). Agroindustria de productos amiláceos: Almidones modificados. *ResearchGate*. Obtenido de : <https://www.researchgate.net/publication/340815684>
- Sandhu, K., Singh, N., & Lim, S. (2007). A comparison of native and acid thinned normal and waxy corn starches: Physicochemical, thermal, morphological and pasting properties. *LWT- Food Science and Technology*, 40(1), 1527-1536. doi:10.1016/j.lwt.2006.12.012

- Sang, Y., Seib, P. A., Herrera, A., Prakash, O., & Shi, Y.-c. (29 de Abril de 2009). Effects of alkaline treatment on the structure of phosphorylated wheat starch and its digestibility. *Food Chemistry*, 118(2), 323-327. doi:10.1016/j.foodchem.2009.04.121.
- Schmitz, C. S., de Simas, K. N., Santos, K., Joao, J., de Mello, R., & Amante, E. (2006). Cassava starch functional properties by etherification - hydroxypropylation. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(6), 681-687. doi:10.1111/j.1365-2621.2005.01136.x
- Seow, C., & Thevamalar, K. (1993). Internal Plasticization of Granular Rice Starch by Hydroxypropylation: Effects on Phase Transitions Associated with Gelatinization. *Starch - Stärke*, 45(3), 85-88. doi:10.1002/star.19930450303
- Seymour, L., & Carraher, C. (1996). *Introducción a la química de polímeros*. Editorial Reverté.
- Shin, S., Byun, J., Hwa, K., & Wha, T. (2004). Effect of Partial Acid Hydrolysis and Heat-Moisture Treatment on Formation of Resistant Tuber Starch. *Food Chemistry*, 86(4), 601-608. doi:10.1016/j.foodchem.2003.10.008
- Shujun, W., Jinglin, Y., Jiping, P., & Hongyan, L. (2008). Structure characterization of C-type starch granule by acid hydrolysis. *Food Hydrocolloids*, 22(7), 1283-1290. doi:10.1016/j.foodhyd.2007.06.012
- Singh, J., Kaur, L., & McCarthy, O. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. *Food Hydrocolloids*, 21(1), 1-22. doi:10.1016/j.foodhyd.2006.02.006
- Singh, N., Chawla, D., & Singh, J. (2004). Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch. *Food Chemistry*, 86(4), 601-608. doi:10.1016/j.foodchem.2003.10.008
- Sitohy, M. Z., Salah M, E., & Ramadan, M. F. (2000). Physicochemical Properties of Different Types of Starch Phosphate Monoesters. *Starch - Starke*, 52(4), 101-105. doi:10.1002/1521-379x(200006)52:4<101::aid-star101>3.0.co;2-w
- Sivoli, L., Pérez Sira, E., & Pedro . (2005). Cambios en la estructura granular durante el proceso de modificación química (fosfatado-acetilado) del almidón de yuca analizados por microscopía óptica y electrónica. *Acta Microscopica*, 14(1-2), 5-9.
- Taggart, P. (2004). Starch as an ingredient: manufacture and applications. *Starch in food*, 363-392. doi:10.1533/9781855739093.3.363
- Taylor, & Francis. (17 de Octubre de 2013). Effect of Acid Hydrolysis on Starch structure and Functionality: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.

- The Food Tech. (7 de Agosto de 2023). *El rol innovador del almidón en la industria alimentaria*. Obtenido de <https://thefoodtech.com/ingredientes-y-aditivos-alimentarios/el-rol-innovador-del-almidon-en-la-industria-alimentaria/>
- Thomas, D. J., & Atwell, W. A. (1999). *Starch structure in: Starches : Practical guides for the food industry*. USA: Eagan Press Handbook.
- Thys, S., Aires, G., Marczak, F., & Noreña, Z. (2013). The effect of acid hydrolysis on the technological functional properties of pinhão (*Araucaria brasiliensis*) starch. *Food Science Technology*, 31(1), 89-94.
- Torres, D. R. (2015). Potencial agroalimentario del almidón de arroz de tres variedades cultivadas en el departamento de Tolima. Ibagué, Tolima, Colombia.
- Van Hung, P., & Morita, N. (2005). Effects of Granule Sizes on Physicochemical Properties of Cross-linked and Acetylated Wheat Starches. *Starch-Starke*, 57(9), 413-420. doi:10.1002/star.200500417
- Vargas, E. A., Falfan, R. N., Ricardo Navarro, J. Á., Castro, J., & Gómez, C. A. (25 de Julio de 2019). *Double Chemical Modification in rice starch: acid hydrolysis optimization process and phosphating*. © 2019 The Author(s). Published with license by Taylor & Francis Group, LLC.
- Vian , A. (1994). *Introducción a la química industrial*. Barcelona, España.: Editorial Reverté.
- Wang , S., Jinglin, Y., & Wenyuan , G. (2007). Morphological and granular changes in native yam (*Dioscorea bulbifera*) starch during acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 69, 286-292.
- Wang, L., & Wang, Y.-J. (2001). Structures and Physicochemical Properties of Acid-Thinned Corn, Potato and Rice Starches. *Starch-Starke*, 53(11), 570-576. doi:10.1002/1521-379X(200111)53:11<570::AID-STAR570>3.0.CO;2-S
- Wang, S., & Copeland, L. (2006). Effect of acid hydrolisis on starch structure and functionality: a review. Sidney, Australia.
- Wang, Y.-J., Truong, V.-D., & Wang, L. (2003). Structures and rheological properties of corn starch as affected by acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 52, 327-333. doi:10.1016/s0144-8617(02)00323-5
- Wurzburg, O. (1986). *Modified Starches: Properties and Uses*. Boca Ratón, Florida: CRC Press, Inc.

IX. ANEXOS

ANEXO I: Datos experimentales para el calculo de propiedades fisicoquímicas del almidón

Tabla 1.1: Datos experimentales para el cálculo de ISA e IAA para almidón nativo

No.	Tratamiento	% de Humedad	Peso Teórico (g)	Peso Real (g)	Tubo vacío (g)	Beaker vacío (g)	Total precipitado (g)	Beaker seco (g)	Volumen sobrenadante (ml)	Peso gel (g)	Peso solubles (g)
1	Nativo-A	12.30%	1.4253	1.4254	13.7554	47.4654	19.3722	47.4676	28	5.6168	0.0022
2	Nativo-B	12.30%	1.4253	1.4254	13.3728	53.8625	19.0313	53.8653	29	5.6585	0.0028

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.2: Datos experimentales para el cálculo de ISA e IAA para almidones hidrolizados

No.	Tratamiento	% de Humedad	Peso teórico (g)	Peso real (g)	Tubo vacío (g)	Beaker vacío (g)	Total precipitado (g)	Beaker seco (g)	Volumen sobrenadante (ml)	Peso gel (g)	Peso solubles (g)
1	T1A-H	13.50%	1.4451	1.4450	13.8411	51.0052	17.4553	51.0300	27	3.6142	0.0248
2	T1B-H	11.52%	1.4127	1.4126	13.8688	53.8718	16.6945	53.8833	28	2.8257	0.0115
3	T2A-H	12.66%	1.4312	1.4324	13.5292	47.4575	16.3185	47.4701	28	2.7893	0.0126
4	T2B-H	12.96%	1.4361	1.4367	13.7770	50.5783	16.5833	50.5883	28	2.8063	0.0100
5	T3A-H	9.91%	1.3875	1.3874	13.7351	66.8690	16.3759	66.8820	28	2.6408	0.0130
6	T3B-H	10.30%	1.3935	1.3936	13.6843	50.9125	16.3219	50.9251	28	2.6376	0.0126
7	T4A-H	9.90%	1.3873	1.3876	13.4461	53.7887	16.0291	53.7995	29	2.5830	0.0108
8	T4B-H	13.40%	1.4434	1.4437	13.6921	65.8953	16.3681	65.9067	29	2.6760	0.0114

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.3: Datos experimentales para el cálculo de ISA e IAA para almidones fosfatados

No.	Tratamiento	Humedad	Peso teórico (g)	Peso real (g)	Tubo vacío (g)	Beaker vacío (g)	Total precipitado (g)	Beaker seco (g)	Volumen sobrenadante (ml)	Peso gel (g)	Peso solubles (g)
1	T1A-F	12.31%	1.4255	1.4256	13.8462	31.1249	17.3708	31.1307	28	3.5246	0.0058
2	T1B-F	11.30%	1.4092	1.4094	13.6545	52.9446	17.1115	52.9525	28	3.457	0.0079
3	T2A-F	12.13%	1.4226	1.4226	13.7202	69.0089	17.8672	69.0203	27	4.147	0.0114
4	T2B-F	12.20%	1.4237	1.4239	13.8072	66.7125	17.3608	66.7196	27	3.5536	0.0071
5	T3A-F	11.62%	1.4143	1.4144	13.8121	51.0016	18.1714	51.0221	26	4.3593	0.0205
6	T3B-F	13.53%	1.4456	1.4456	13.8438	53.8708	17.358	53.8779	28	3.5142	0.0071
7	T4A-F	11.92%	1.4192	1.4194	13.543	50.5978	17.3342	50.6089	27	3.7912	0.0111
8	T4B-F	11.74%	1.4163	1.417	13.7199	47.4716	17.7335	47.4902	26	4.0136	0.0186

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.4: Datos experimentales para el cálculo del índice de acidez de almidones hidrolizados

No.	Tratamiento	Humedad	Peso teórico (g)	Peso real (g)	Volumen gastado de NaOH (ml)	Normalidad promedio (N _p)
1	T1A-H	13.50%	23.1213	23.1176	0.1	0.10
2	T1B-H	11.52%	22.6039	22.6043	0.2	0.10
3	T2A-H	12.66%	22.8990	22.8991	0.1	0.10
4	T2B-H	12.96%	22.9779	22.9671	0.1	0.10
5	T3A-H	9.91%	22.2000	22.2	0.1	0.10
6	T3B-H	8.70%	21.9058	21.905	0.1	0.10
7	T4A-H	8.49%	21.8555	21.8558	0.1	0.10
8	T4B-H	13.99%	23.2531	23.2433	0.1	0.10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.5: Datos experimentales para el cálculo del índice de acidez de almidones fosfatados

No.	Tratamiento	Humedad	Peso teórico (g)	Peso real (g)	Volumen gastado de NaOH (ml)	Normalidad promedio (N _p)
1	T1A-F	12.62%	22.8885	22.8895	0.2	0.10
2	T1B-F	10.34%	22.3064	22.3086	0.2	0.10
3	T2A-F	11.89%	22.6989	22.6969	0.2	0.10
4	T2B-F	12.03%	22.7350	22.7376	0.2	0.10
5	T3A-F	10.20%	22.2717	22.2723	0.3	0.10
6	T3B-F	13.08%	23.0096	23.0081	0.4	0.10
7	T4A-F	11.93%	22.7092	22.6921	0.5	0.10
8	T4B-F	11.42%	22.5784	22.5788	0.6	0.10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.6: Datos experimentales para el cálculo del índice de acidez de almidón nativo

No.	Tratamiento	Humedad	Peso teórico (g)	Peso real (g)	Volumen gastado de NaOH (ml)	Normalidad promedio (N _p)
1	T1A-N	12.26%	22.7946	22.7921	0.2	0.10
2	T1B-N	12.26%	22.7946	22.7886	0.3	0.10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.7: Resultados para las réplicas de cada tratamiento del diseño experimental.

No.	Tratamiento	Parámetro Muestra	Viscosidad (mPa.s)	Temperatura de gelatinización (°C)	ISA	IAA	Índice de acidez (meq/g muestra)
1	Nativo	A	21 540	67	0.43	3.94	0.0004
2		B	21 385	67	0.57	3.97	0.0006
3	HIDROLIZADO	T1A-H	524	70.2	4.63	2.50	0.0002
4		T1B-H	560	70.2	2.28	2.00	0.0004
5		T2A-H	220	70.1	2.46	1.95	0.0002
6		T2B-H	180	69	1.95	1.95	0.0002
7		T3A-H	110	69.9	2.62	1.90	0.0002
8		T3B-H	88.2	69.9	2.53	1.89	0.0002
9		T4A-H	28.6	70.1	2.26	1.86	0.0002
10		T4B-H	37.9	70.2	2.29	1.85	0.0002
11	FOSFATADO	T1A-F	14 530	70.2	1.14	2.47	0.0004
12		T1B-F	22 390	70.2	1.57	2.45	0.0004
13		T2A-F	28 020	70.1	2.16	2.92	0.0004
14		T2B-F	16 690	69	1.35	2.50	0.0004
15		T3A-F	20 140	69.9	3.77	3.08	0.0006
16		T3B-F	18 800	69.9	1.38	2.43	0.0008
17		T4A-F	16 890	70.1	2.11	2.67	0.0010
18		T4B-F	21 130	70.2	3.41	2.83	0.0012

Fuente: Elaboración propia

ANEXO II: Equipos de Laboratorio



Figura 2.1: Balanza semi-analitica. (Elaboración propia)



Figura 2.2: Detector de humedad. (Elaboración propia)



Figura 2. 3: Viscosímetro Brookfield Lamy Rheology modelo B-One plus LVT. (Elaboración propia)



Figura 2. 4: Aguja L2 para Viscosímetro Brookfield Lamy Rheology modelo B-One plus LVT. (Elaboración propia)

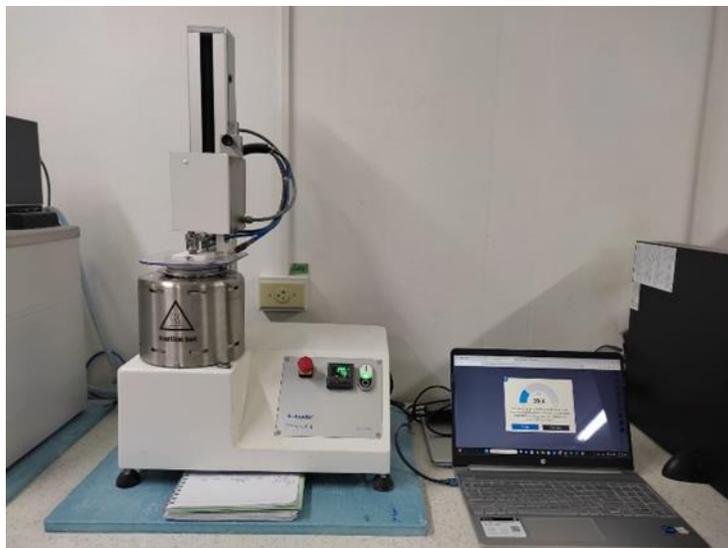


Figura 2. 5: Viscógrafo Brabender-E (Viscosímetro estándar de almidón). (Elaboración propia)



Figura 2. 6: Centrifuga CORNING. (Elaboración propia)



Figura 2. 7: Horno TERMOSTATIC OVEN M710. (Elaboración propia)



Figura 2. 8: Agitador-calentador Fisher Brand. (Elaboración propia)



Figura 2. 9: Bomba de vacío. (Elaboración propia)



Figura 2.10: pH-metro. (Elaboración propia)



Figura 2.11: Tamices de malla 60 y 230. (Elaboración propia)



Figura 2.12: Pistola de aire caliente. (Elaboración propia)

Anexo III: Viscoamilogramas Brabender

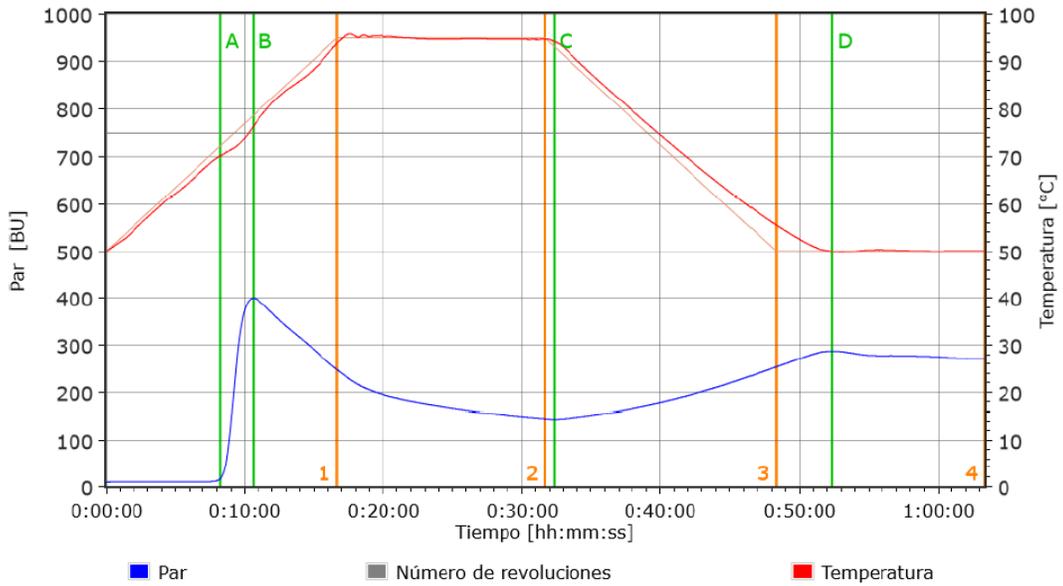


Figura 3. 1: Viscoamilograma T1-H, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T1A-H (40°C, 0.5 N, 1h). (Elaboración propia)

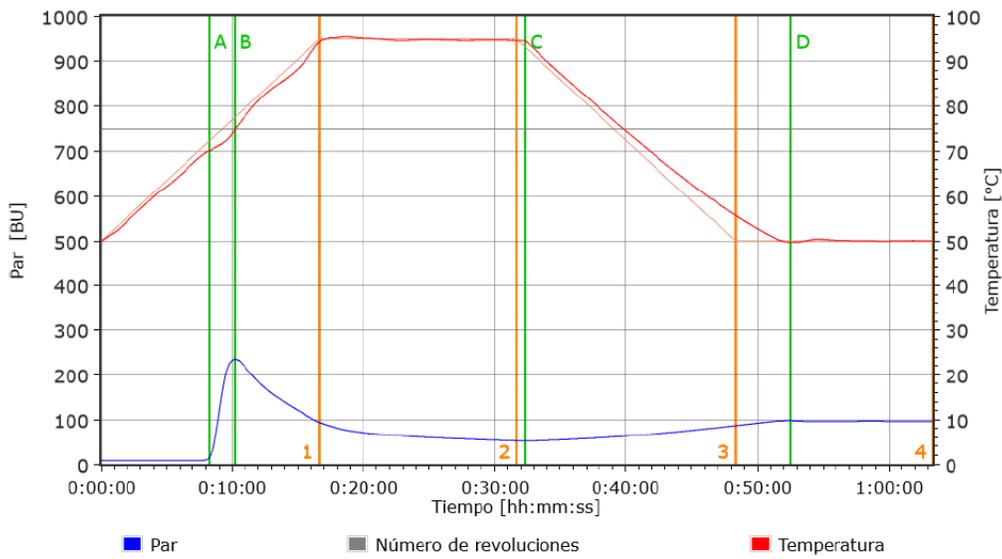


Figura 3. 2: Viscoamilograma T2-H, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T2A-H (40°C, 0.5 N, 2h). (Elaboración propia)

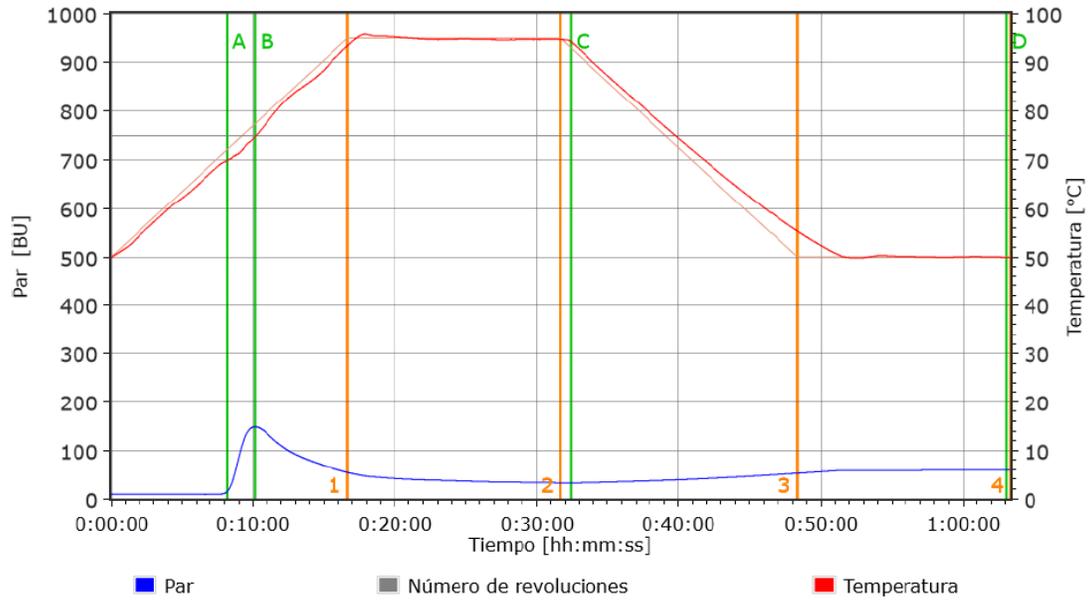


Figura 3. 3: Viscoamilograma T3-H, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T3A-H (40°C, 1.0 N, 1h). (Elaboración propia)

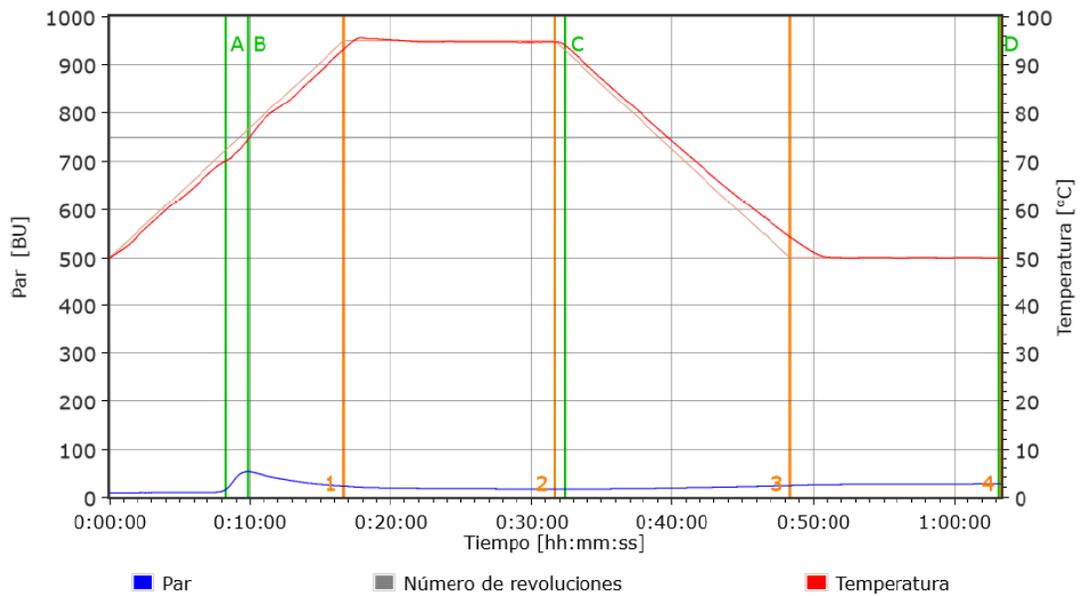


Figura 3. 4: Viscoamilograma T4-H, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T4A-H (40°C, 1.0 N, 2h). (Elaboración propia)

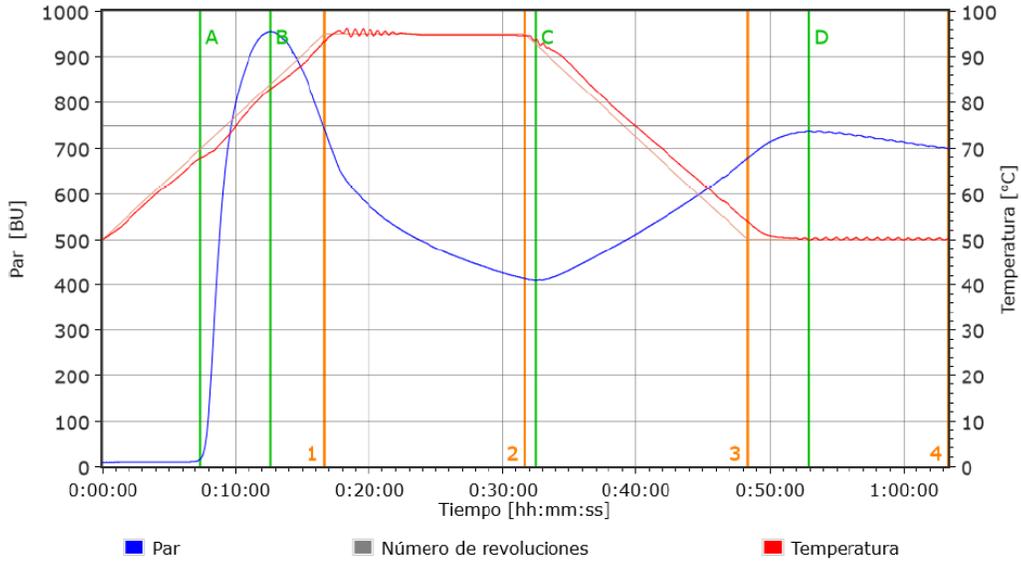


Figura 3.5: Viscoamilograma T1-F, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T1A-F (40°C, 0.1%, 0.5h). (Elaboración propia)

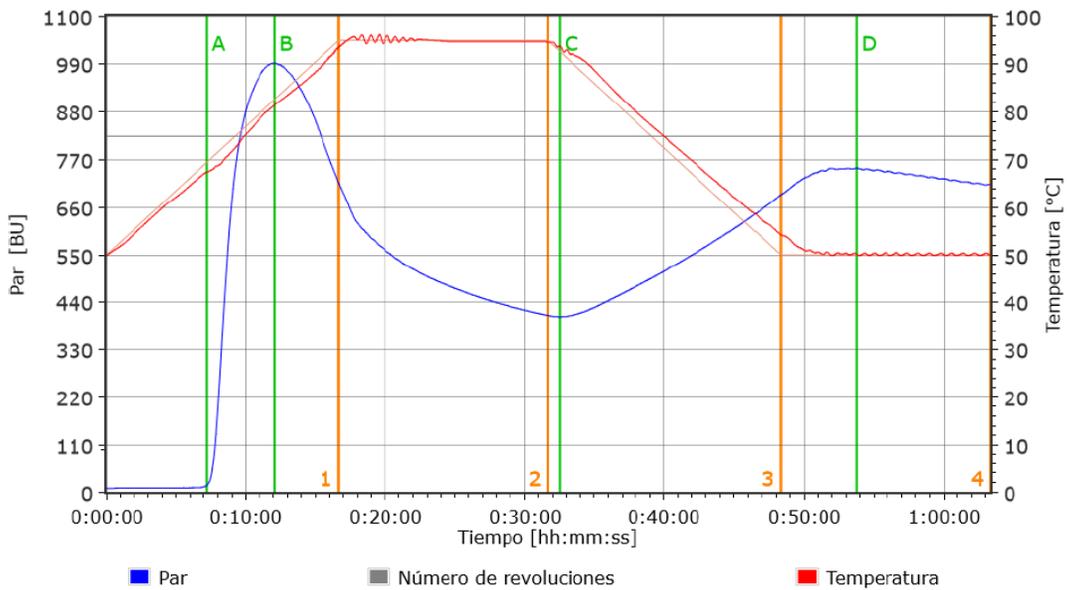


Figura 3.6: Viscoamilograma T2-F, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T2A-F (40°C, 0.1%, 1h). (Elaboración propia)

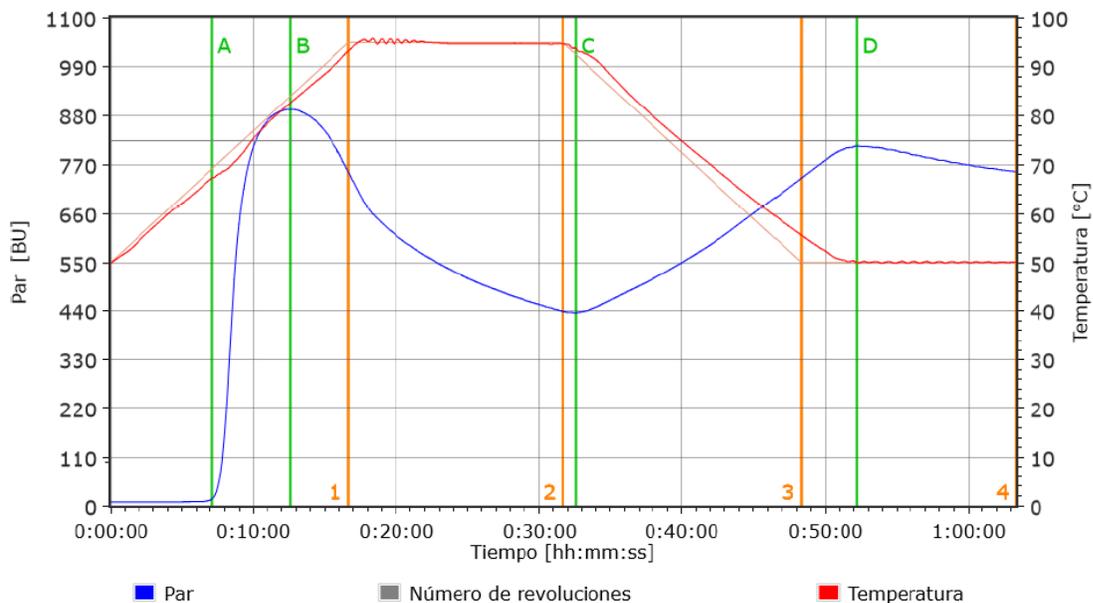


Figura 3. 7: Viscoamilograma T3-F, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T3A-F (40°C, 0.5%, 0.5h). (Elaboración propia)

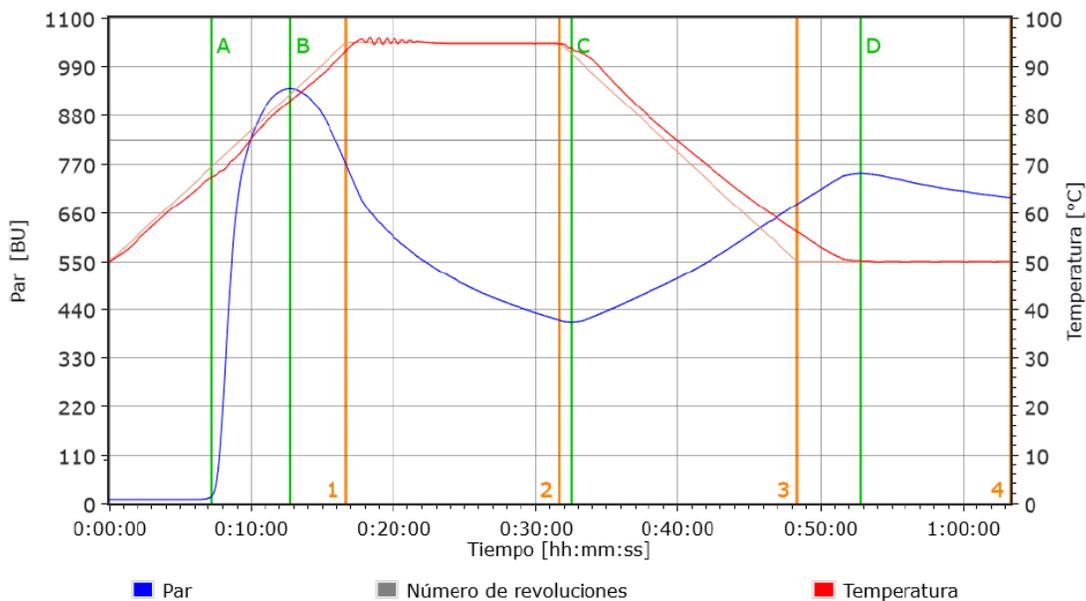


Figura 3. 8: Viscoamilograma T4-F, análisis realizado con un viscógrafo Brabender, utilizando la muestra T4A-F (40°C, 0.5%, 1h). (Elaboración propia)