



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Caracterización fisicoquímica y funcional del almidón de dos clones de achira (*Canna edulis*)**

**Andrea Herrera Cardona**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2024

# **Caracterización fisicoquímica y funcional del almidón de dos clones de achira (*Canna edulis*)**

**Andrea Herrera Cardona**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería de Biosistemas**

Directora:

Dr. Ing. Sonia Lucía Rincón Prat

Codirectora:

Dr. Ing. María Cristina García Muñoz

Línea de Investigación:

**POSCOSECHA Y PROCESOS AGROINDUSTRIALES**

Grupo de Investigación:

**BIOMASA Y OPTIMIZACIÓN TÉRMICA DE PROCESOS (Universidad Nacional)  
INNOVACIÓN TECNOLÓGICA DE PROCESOS AGROINDUSTRIALES PARA EL  
DESARROLLO RURAL (Agrosavia)**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2024



*A Dios.*

*A la memoria de mi padre, cuyo amor y orientación han dejado una huella indeleble en mi vida. A través de su ejemplo, aprendí el valor del esfuerzo, la determinación y el cariño incondicional.*

*A mi madre, cuyo amor incondicional y apoyo me han motivado a superar los retos y continuar el camino. Su sacrificio y dedicación han sido fundamentales en mi crecimiento académico y personal.*

*A mi hermano, compañero de esta aventura quien me ha brindado su apoyo incondicional en esta etapa, brindándome fortaleza y motivación en cada paso.*

*A mi hermana, testigo de mis logros y fracasos, siempre dispuestos a celebrar mis éxitos y ofrecer consuelo en las derrotas.*

## Agradecimientos

Agradezco a Dios, mi fuente de fortaleza, motivación y guía a lo largo de este capítulo en mi vida académica. Su apoyo fue mi gran ayuda en momentos de tribulación, retos, tristezas y frustraciones. Le agradezco por enseñarme quién soy.

A la Universidad Nacional de Colombia, mi alma mater, donde di mis primeros pasos en investigación en el semillero ICIS (Innovación en el Campo y la Ingeniería para la Sociedad) durante mi pregrado. Agradezco a los docentes que formaron parte de mi desarrollo académico y personal, así como a la infraestructura de los laboratorios de las diferentes facultades que me permitieron llevar a cabo mis ensayos. Un agradecimiento especial a mi directora de tesis, la Dr. Ing. Sonia Lucía Rincón Prat, docente dedicación exclusiva de la Facultad de Ingeniería, y coordinadora del Grupo de Investigación BIOT (Biomasa y Optimización Térmica de Procesos), por su valioso acompañamiento y orientación.

Agradezco a Agrosavia, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, por impulsar mi proyecto desde su propuesta hasta la inversión económica necesaria para su desarrollo; por el apoyo en el uso de los laboratorios y especialmente a la Dr. Ing. María Cristina García Muñoz, mi codirectora de tesis, por sus significativas contribuciones al proyecto y su dedicación en cada etapa del desarrollo. Agradezco también a la Profesional de Apoyo a la Investigación (PAI) Ana María Calvo Salamanca y a Sindy Lorena Mojica Ramos por su guía y apoyo en los ensayos de laboratorio.

A mi mamá, la persona más incondicional, que sacrificó mucho por mi bienestar para culminar mis estudios. A mi hermano mayor Faver Herrera por abrirme las puertas de su casa y brindarme apoyo y motivación. A mi cuñada por sus enseñanzas profesionales clave para la culminación del proyecto. A mis amigos de "Sin Medida" les agradezco por su apoyo y oraciones en los momentos de desesperanza.



## Resumen

### Caracterización fisicoquímica y funcional del almidón de dos clones de achira (*Canna edulis*)

Este estudio aborda la caracterización de los almidones de dos clones de achira, denominados clon 2008 – 001 y clon 2007 – 006, con el propósito de identificar oportunidades para su aplicación industrial en concordancia con las actuales directrices y políticas ambientales, así como su uso en aditivos alimentarios. Ambos almidones demostraron similitudes fisicoquímicas, destacando su condición como fuentes ricas de almidón con igual contenido de amilosa ( $\approx 32\%$ ). Los almidones tienen un elevado contenido de minerales, un pH ligeramente ácido ( $\approx 6,1$ ), actividad de agua moderada ( $\approx 0,6$ ) y un alto índice de blancura ( $\approx 92\%$ ). En cuanto a características morfológicas, ambos clones exhibieron gránulos de superficie lisa y regular, con el clon 2008 – 001 mostrando una forma más ovalada y el clon 2007 – 006 una forma más redonda. El clon 2007 – 006 presentó una menor cristalinidad (21,7%), indicando un mayor potencial de asimilación por el organismo humano. En relación con las propiedades térmicas y reológicas, se observaron diferencias significativas. El clon 2008 – 001 presentó mayor temperatura de gelatinización (67,6 °C) en comparación con el clon 2007 – 006 (63,3 °C). El clon 2007 – 006 mostró viscosidad más alta (427 UB) y formó geles más firmes, mientras que el clon 2008 – 001 formó pastas más claras. Ambos almidones presentaron baja retrogradación, preservando la transparencia de las soluciones. Estos hallazgos subrayan la importancia de comprender las propiedades específicas de cada almidón para su aplicación precisa en la industria alimentaria y no alimentaria.

**Palabras clave:** almidón de achira, propiedades químicas, características morfológicas, cristalinidad, gelatinización, comportamiento reológico, claridad de la pasta.

# Abstract

## Physicochemical and functional characterization of starch from two clones of achira (*Canna edulis*)

This study addresses the characterization of starches from two arrowroot clones, denominated as clone 2008 – 001 and clone 2007 – 006, with the purpose of identifying opportunities for their industrial application in accordance with current environmental guidelines and policies, as well as their use in food additives. Both starches demonstrated physicochemical similarities, emphasizing their status as rich sources of starch with an equal amylose content ( $\approx 32\%$ ). The starches exhibited a high mineral content, slightly acidic pH ( $\approx 6.1$ ), moderate water activity ( $\approx 0.6$ ), and a high whiteness index ( $\approx 92\%$ ). In terms of morphological characteristics, both clones displayed granules with a smooth and regular surface, with clone 2008 – 001 showing a more oval shape and clone 2007 – 006 a more rounded shape. Clone 2007 – 006 presented lower crystallinity (21.7%), indicating a greater potential for assimilation by the human body. Regarding thermal and rheological properties, significant differences were observed. Clone 2008 – 001 exhibited a higher gelatinization temperature (67.6 °C) compared to clone 2007 – 006 (63.3 °C). Clone 2007 – 006 showed higher viscosity (427 BU) and formed firmer gels, while clone 2008 – 001 formed clearer pastes. Both starches exhibited low retrogradation, preserving the transparency of solutions. These findings underscore the importance of understanding the specific properties of each starch for its precise application in the food and non-food industry.

**Keywords:** Achira starch, chemical properties, morphological characteristics, crystallinity, gelatinization, rheological behavior, pasta clarity.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>VII</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. El almidón.....</b>	<b>3</b>
2.1 Producción de almidón.....	3
2.2 Características del almidón .....	4
2.2.1 Características fisicoquímicas.....	4
2.2.2 Características del gránulo .....	5
2.2.3 Características funcionales.....	7
2.2.4 Propiedades de la pasta .....	10
2.3 El almidón de achira ( <i>Canna edulis</i> ).....	13
2.3.1 Generalidades .....	13
2.3.2 Proceso de extracción del almidón .....	16
2.3.3 Composición química.....	17
2.3.4 Propiedades físicas .....	18
2.3.5 Características térmicas .....	19
2.3.6 Propiedades reológicas .....	21
2.3.7 Características funcionales.....	22
2.4 Aplicaciones del almidón.....	23
2.4.1 Industria alimentaria .....	24
2.4.2 Industria cosmética.....	24
2.4.3 Industria farmacéutica.....	25
2.4.4 Industria textil .....	25
2.4.5 Industria de papel, cartón y ligantes.....	26
2.4.6 Otras aplicaciones .....	26
<b>3. Materiales y métodos.....</b>	<b>27</b>
3.1 Muestreo .....	28
3.2 Diseño de la investigación.....	31
3.3 Características fisicoquímicas .....	32
3.3.1 Análisis proximal.....	32
3.3.2 Contenido mineral.....	32
3.3.3 Acidez titulable y pH .....	33

3.3.4	Actividad de agua.....	33
3.3.5	Densidad real .....	34
3.3.6	Contenido de almidón total .....	34
3.3.7	Contenido de amilosa y amilopectina .....	35
3.3.8	Color .....	36
3.4	Características morfológicas.....	36
3.4.1	Morfología del gránulo.....	36
3.4.2	Análisis de la estructura cristalina .....	37
3.5	Características térmicas.....	37
3.6	Características reológicas.....	38
3.6.1	Propiedades de la pasta.....	38
3.6.2	Claridad del gel .....	38
3.6.3	Perfil de textura .....	38
3.7	Características funcionales .....	39
3.7.1	Índice de absorción de agua.....	39
3.7.2	Poder de hinchamiento.....	39
3.7.3	Índice de solubilidad .....	40
3.7.4	Capacidad de retención de agua y aceite.....	40
3.8	Curvas de secado e isothermas de sorción.....	41
3.8.1	Curvas de secado .....	41
3.8.2	Isotermas de sorción .....	42
<b>4.</b>	<b>Resultados y análisis.....</b>	<b>45</b>
4.1	Muestreo.....	45
4.2	Características fisicoquímicas.....	46
4.2.1	Análisis proximal .....	46
4.2.2	Contenido mineral .....	49
4.2.3	Acidez titulable y pH.....	52
4.2.4	Actividad de agua.....	53
4.2.5	Densidad real .....	54
4.2.6	Contenido de almidón total .....	55
4.2.7	Contenido de amilosa y amilopectina .....	55
4.2.8	Color .....	57
4.3	Características morfológicas.....	59
4.3.1	Morfología del gránulo.....	59
4.3.2	Análisis de la estructura cristalina .....	61
4.4	Características térmicas.....	63
4.5	Características reológicas.....	66
4.5.1	Propiedades de la pasta.....	66
4.5.2	Claridad del gel .....	68
4.5.3	Perfil de textura .....	69
4.6	Características funcionales .....	71
4.6.1	Índice de absorción de agua.....	71
4.6.2	Poder de hinchamiento.....	73
4.6.3	Índice de solubilidad .....	74
4.6.4	Capacidad de retención de agua y aceite.....	75
4.7	Curvas de secado e isothermas de sorción.....	76
4.7.1	Curvas de secado .....	76
4.7.2	Isotermas de sorción .....	78
4.8	Aplicaciones del almidón obtenido de los clones estudiados .....	81

<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>85</b>
5.1 Conclusiones.....	85
5.2 Recomendaciones.....	86
<b>Bibliografía .....</b>	<b>87</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1:</b> Estructura química de la amilosa. Fuente: (Aristizábal & Sánchez, 2007). ....	6
<b>Figura 2-2:</b> Estructura química de la amilopectina. Fuente: (Aristizábal & Sánchez, 2007). .....	7
<b>Figura 2-3:</b> Mapa de la distribución de la producción de achira en Colombia para el 2022. Elaboración propia. ....	15
<b>Figura 2-4:</b> Secuencia de actividades para la extracción de almidón de los dos clones de achira. Elaboración propia .....	17
<b>Figura 3-1:</b> Ensayos de laboratorio realizados al almidón de achira ( <i>Canna edulis</i> ). Elaboración propia .....	28
<b>Figura 3-2:</b> Diagrama de operaciones en el proceso de extracción del almidón de achira. Elaboración propia. ....	30
<b>Figura 3-3:</b> Muestras de almidón para las curvas de secado. Elaboración propia .....	42
<b>Figura 3-4:</b> Montaje experimental de las isotermas de sorción. Elaboración propia .....	43
<b>Figura 4-1:</b> Aspectos de los clones de almidón de achira estudiados.....	46
<b>Figura 4-2:</b> Curva estándar del contenido de amilosa con ajuste lineal. ....	56
<b>Figura 4-3:</b> Fotografía SEM para el almidón de achira: Clon 2008 – 001 a (2000x), c (500x), e (200x) y Clon 2007 – 006 b (2000x), d (500x), f (200x) .....	60
<b>Figura 4-4:</b> Perfil de difracción del almidón de achira, clon 2008 – 001.....	62
<b>Figura 4-5:</b> Perfil de difracción del almidón de achira, clon 2007 – 006.....	62
<b>Figura 4-6:</b> Gráfica de la gelatinización del clon 2008 - 001. ....	65
<b>Figura 4-7:</b> Gráfica de la gelatinización del clon 2007 - 006. ....	65
<b>Figura 4-8:</b> Índice de absorción de agua a diferentes temperaturas para los almidones de achira. Elaboración propia.....	72
<b>Figura 4-9:</b> Poder de hinchamiento a diferentes temperaturas para los almidones de achira. Elaboración propia.....	73
<b>Figura 4-10:</b> Índice de absorción de agua a diferentes temperaturas para los almidones de achira. Elaboración propia.....	75
<b>Figura 4-11:</b> Curvas de secado a diferentes temperaturas para del clon 2008 – 001. ....	77
<b>Figura 4-12:</b> Curvas de secado a diferentes temperaturas para el clon 2007 – 006. ....	78
<b>Figura 4-13:</b> Ajuste del modelo de GAB para las isotermas del clon 2008 – 001.....	79
<b>Figura 4-14:</b> Ajuste del modelo de GAB para las isotermas del clon 2007 – 006.....	80

# Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Tamaño de los gránulos, contenido de amilosa y amilopectina de algunas fuentes de almidón. Fuente: (Aristizábal & Sánchez, 2007).....	6
<b>Tabla 2-2:</b> Características químicas del almidón de achira ( <i>Canna edulis</i> ). .....	18
<b>Tabla 2-3:</b> Propiedades térmicas del almidón de achira ( <i>Canna edulis</i> ). .....	20
<b>Tabla 2-4:</b> Propiedades reológicas del almidón de achira ( <i>Canna edulis</i> ) .....	21
<b>Tabla 2-5:</b> Características funcionales del almidón de achira ( <i>Canna edulis</i> ) a las temperaturas de 60 °C y 90 °C.....	22
<b>Tabla 4-1:</b> Resultados del análisis proximal del almidón de los clones de achira estudiados.....	47
<b>Tabla 4-2:</b> Contenido de minerales del almidón de dos clones de achira y su comparación frente a algunos minerales reportados en literatura.....	50
<b>Tabla 4-3:</b> Valores de determinación del pH y el porcentaje de acidez en el almidón de achira. ....	52
<b>Tabla 4-4:</b> Actividad de agua para el almidón de dos clones de achira. ....	53
<b>Tabla 4-5:</b> Densidad real determinada para los almidones de achira evaluados. ....	54
<b>Tabla 4-6:</b> Contenido de almidón presente en las muestras evaluadas de achira. ....	55
<b>Tabla 4-7:</b> Contenido de amilosa y amilopectina del almidón de achira de dos clones... ..	56
<b>Tabla 4-8:</b> Índice de blancura y delta L*, a* y b* para el almidón de dos clones de achira .....	58
<b>Tabla 4-9:</b> Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para el almidón de dos clones de achira. ....	64
<b>Tabla 4-10:</b> Propiedades de la pasta obtenidos en el viscoamilógrafo de Brabender para el almidón de dos clones de achira.....	67
<b>Tabla 4-11:</b> Transmitancia para el almidón de dos clones de achira. ....	69
<b>Tabla 4-12:</b> Perfil de textura para el almidón de dos clones de achira y otros almidones reportados en la literatura.....	70
<b>Tabla 4-13:</b> Resultados de la capacidad de retención de agua y aceite del almidón de dos clones de achira.....	76
<b>Tabla 4-14:</b> Constantes determinadas para los modelos evaluados para el clon 2008 - 001.....	79
<b>Tabla 4-15:</b> Constantes determinadas para los modelos evaluados para el clon 2007 - 006.....	80
<b>Tabla 4-16:</b> Aplicaciones del almidón del clon 2008 - 001 en algunas industrias. ....	82
<b>Tabla 4-17:</b> Aplicaciones del almidón del clon 2007 - 006 en algunas industrias. ....	83

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
%	Porcentaje	Por ciento
<i>T</i>	Temperatura	° C
<i>A<sub>w</sub></i>	Actividad de agua	-
<i>B</i>	Boro	ppm
<i>Ca</i>	Calcio	ppm
<i>CH<sub>bh</sub></i>	Contenido de humedad en base húmeda	%
<i>Cu</i>	Cobre	ppm
<i>Fe</i>	Hierro	ppm
<i>g</i>	Gramos	Kg
<i>gf</i>	Gramos fuerza	N
<i>He</i>	Helio	-
<i>J</i>	Julios	J
<i>K</i>	Potasio	ppm
<i>L*, a*, b*</i>	Luminosidad, tonalidad de rojos a verdes, tonalidad de amarillos a verdes	-
<i>Mg</i>	Magnesio	ppm
<i>mL</i>	Mililitros	m <sup>3</sup>
<i>mm</i>	Milímetros	mm
<i>Mn</i>	Manganeso	ppm
<i>msnm</i>	Metros sobre el nivel del mar	m
<i>N</i>	Normalidad	-
<i>Na</i>	Sodio	ppm
<i>NaOH</i>	Hidróxido de sodio	N
<i>nm</i>	Nanómetro	m
<i>P</i>	Fósforo	ppm
<i>pH</i>	Acidez o alcalinidad	-
<i>S</i>	Azufre	ppm
<i>Si</i>	Silicio	ppm
<i>T<sub>o</sub></i>	Temperatura inicial	° C
<i>T<sub>p</sub></i>	Temperatura pico	° C
<i>T<sub>f</sub></i>	Temperatura final	° C
<i>Ton</i>	Toneladas	Kg

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
$\Delta H$	Cambio de entalpía	J/g
$\mu L$	Microlitros	$1 \times 10^{-6}$ L
$2\theta$	Ángulo en DRX	°

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>Amylose</i>	Amilosa de papa (marca SIGMA)
<i>Amylopectine</i>	Amilopectina de papa (marca SIGMA)
<i>BD</i>	Breakdown: Desgloce
<i>CIELab</i>	Espacio Uniforme de Color CIE L*, a*, b*
<i>CRA</i>	Capacidad de Retención de Agua
<i>CRL</i>	Capacidad de Retención de Aceite
<i>DSC</i>	Calorimetría Diferencial de Barrido
<i>DRX</i>	Difracción de Rayos X
<i>IAA</i>	Índice de Absorción de Agua
<i>IB</i>	Índice de blancura
<i>ISA</i>	Índice de Solubilidad de Agua
<i>NTC</i>	Norma Técnica Colombiana
<i>PEA</i>	Prueba de Evaluación Agronómica
<i>PH</i>	Poder de Hinchamiento
<i>PV</i>	Peakviscosity: Viscosidad Máxima
<i>SB</i>	Seatback: Retroceso
<i>SEM</i>	Microscopía Electrónica de Barrido





# 1.Introducción

El almidón es un componente esencial en la alimentación humana, en diversas regiones del mundo, siendo las fuentes más conocidas y utilizadas el maíz, el trigo, el arroz, la papa y la yuca. La caracterización física, química y reológica de estos almidones, así como los avances en los métodos de extracción, purificación y modificación han expandido su aplicación en diversas industrias (Cui et al., 2022; Wang et al., 2023). El almidón constituye una materia prima con ventajas determinantes como alta disponibilidad, bajo costo, renovabilidad y biocompatibilidad. Estas características son coherentes con las directrices y políticas ambientales actuales, así como con su aplicación en aditivos alimentarios.

Estas tendencias han incrementado el interés en la investigación en este recurso, con el objetivo de explorar y expandir sus aplicaciones en diversos ámbitos (Obadi et al., 2023; Otegbayo et al., 2014). El almidón tiene una gran variedad de usos, en la industria alimenticia, la industria farmacéutica, la industria cosmética, la industria textil, la industria papelera, y otros usos (Lobo et al., 2017; Purwitasari et al., 2023; Wang et al., 2023) y estos usos dependen de la extracción y el origen botánico del material vegetal (Piyachomkwan et al., 2002).

Aunque existe una gran diversidad de productos amiláceos, los almidones más conocidos y utilizados son los de maíz, yuca, trigo y papa, lo cual se refleja en la abundancia de estudios existentes sobre ellos. Caso contrario sucede con los almidones tropicales, aquellos que son obtenidos a partir del arrurruz, el taro, la batata, el ñame y el sagú o achira, los cuales han sido poco estudiados (Piyachomkwan et al., 2002; Singla et al., 2020). A pesar de presentar características que pueden señalar su potencial de uso en las diferentes industrias, pocos estudios han sido realizados con los almidones tropicales, o se quedan en etapas muy primarias que no permiten explotar este potencial.

En conclusión, el almidón de achira, por sus propiedades y características, podría presentar beneficios similares a los de otros almidones ampliamente empleados en

diversas aplicaciones industriales y culinarias (Huang et al., 2013; Piyachomkwan et al., 2002; Zhang, Wang, & Shi, 2010). Por lo anterior, es importante estudiar las características de este almidón para comprender su funcionalidad en diversas aplicaciones. Con este propósito, la presente investigación se basa en la formulación de la hipótesis nula de que no existen diferencias significativas entre el almidón de los clones promisorios del cultivo de achira (*Canna edulis*) en cuanto a las características físicas, químicas, térmicas, reológicas y funcionales que determinen su potencial uso en la industria, mientras que la hipótesis alternativa postula que al menos una diferencia existe en sus propiedades analizadas que influye en su potencial uso en la industria. De esta manera, el objetivo de la presente investigación fue realizar la caracterización fisicoquímica, térmica, reológica y funcional del almidón de achira proveniente de dos clones, con el fin de identificar su potenciales uso en los sectores industriales estudiados.

## 2. El almidón

El almidón es un biopolímero ampliamente presente en la naturaleza que se utiliza como fuente de energía para el desarrollo y funcionamiento de los organismos (Cui et al., 2022; Hedayati & Niakousari, 2018). Este carbohidrato desempeña un papel fundamental en la nutrición humana al ser altamente digerible, aportando entre el 70% y el 80% de las calorías necesarias para el organismo (Bertolini, 2010; Chiranthika et al., 2022; Obadi et al., 2023). De manera similar, para las plantas, el almidón es una importante reserva energética, esencial para su crecimiento, desarrollo y supervivencia bajo condiciones adversas (Aleixandre & Rosell, 2022; Chen et al., 2022).

En la naturaleza, el almidón está presente en diversas fuentes alimentarias (Fuentes et al., 2019; Wang et al., 2023) como cereales (maíz, trigo, arroz, cebada); legumbres (frijoles, lentejas, garbanzos); raíces y tubérculos (papa, yuca, achira). Algunos frutos, como el plátano, el banano y la manzana, contienen importantes cantidades de almidón (Chiranthika et al., 2022; Cui et al., 2022; Kheto et al., 2022; Salazar et al., 2021; Vilpoux et al., 2019). Estas fuentes son empleadas como alimentos básicos en diversas culturas, así como en la industria alimentaria para la producción de una amplia gama de productos (Cui et al., 2022; Mendez et al., 2022).

### 2.1 Producción de almidón

En el 2022 la producción mundial de almidón se estimó en un rango de 800 a 1 000 millones de toneladas, donde el 75 % se obtuvo del maíz, el 14 % de la yuca y la mandioca, el 7 % del trigo y 4 % de la patata (Vilpoux & Santos, 2023). Las raíces y los tubérculos son fuentes de almidón de gran importancia para el consumo humano, y la yuca y la papa son los más cultivados (Chiranthika et al., 2022). La yuca ha sido uno de los cultivos utilizados para la producción de almidón (García et al., 2013), alcanzando una producción mundial

de 300 millones de toneladas de almidón en 2022 (FAOSTAT), con Nigeria, República Democrática del Congo, Tailandia, Ghana, Brasil, Indonesia y Vietnam como los mayores productores. Por otro lado, el almidón de las raíces y tubérculos que no son comunes, como el taro, el arrurruz, la batata y el ñame (Chiranthika et al., 2022), presentaron una producción mundial de 23 millones de toneladas en 2022 (FAOSTAT, 2022) con Indonesia, Tailandia, Perú y México como los mayores productores. De otra parte, se considera a China el mayor productor de almidón en materias primas como el maíz, el arroz y el trigo, con una producción alrededor de 400 millones de toneladas de almidón (OCDE/FAO, 2020).

## 2.2 Características del almidón

El almidón está constituido por unidades de glucosa que conforman gránulos, los cuales están compuestos por dos tipos de polímeros: la amilosa y la amilopectina. Estas macromoléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación, lo cual determina su comportamiento bajo diferentes procesos de degradación. El contenido de amilosa y el grado de polimerización determinan las propiedades físicas, químicas y funcionales del almidón (Purwitasari et al., 2023; Salazar et al., 2021; Zhang, Wang, & Yang, 2010). Entre las propiedades fisicoquímicas más importantes del almidón, cabe mencionar la composición proximal (contenido de proteína cruda, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y humedad), las características del gránulo (tamaño, color y forma, naturaleza cristalina), el peso molecular y el contenido de amilosa y amilopectina (Pardo et al., 2013; Zárate et al., 2014). Entre las características funcionales de los almidones se encuentran: solubilidad, capacidad de retención de agua, poder de hinchamiento, tendencia a retrogradar, propiedades de la pasta (viscosidad, consistencia, estabilidad del gel, claridad y resistencia al corte, formación de película), digestibilidad enzimática y capacidad de emulsificación (Garnica et al., 2010).

### 2.2.1 Características fisicoquímicas

Las propiedades físicas del almidón hacen referencia a las características intrínsecas y comportamientos físicos de este polisacárido. La forma y el tamaño del gránulo del almidón son factores que influyen en las características físicas y funcionales del almidón, como su capacidad de hinchamiento, retención de agua y digestibilidad enzimática (Peroni et al.,

2006; Villa et al., 2020). De igual manera, la distribución del tamaño de partículas en el almidón puede influir en su comportamiento reológico (Otegbayo et al., 2014).

Entre estas características, el contenido de humedad es uno de los parámetros de mayor importancia, ya que determina el comportamiento durante la manipulación y el almacenamiento de los alimentos (Salazar et al., 2021). De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana (NTC) – 3228, la cual establece los requisitos y ensayos que debe cumplir el almidón de achira, el contenido máximo permitido para la humedad en almidones es del 20%. En lo que respecta al contenido de lípidos, el almidón comúnmente presenta pequeñas cantidades (Jaramillo, 2013), siendo el almidón de arracacha el que reporta los mayores contenidos (5%) (Salas, 2018), seguido por el almidón de maíz con valores entre 4,07% y 7,73% en diferentes variedades (Mex et al., 2016), mientras que la yuca y la papa presentan valores más bajos del 0,8% y el 0,6% respectivamente (Aristizábal & Sánchez, 2007).

En cuanto a la proteína, los almidones provenientes de raíces y tubérculos son muy bajos, con un 0,18% para el almidón de papa (Guízar et al., 2008) y un 0,4% para el almidón de yuca (Kayode et al., 2021). El contenido de fibra cruda en el almidón de algunas variedades de yuca está en el rango de 1,88% a 2,52% (Rojas, 2012), mientras que para el almidón de algunas variedades de maíz, este parámetro oscila entre 2,58% y 2,97% (Mex et al., 2016).

### **2.2.2 Características del gránulo**

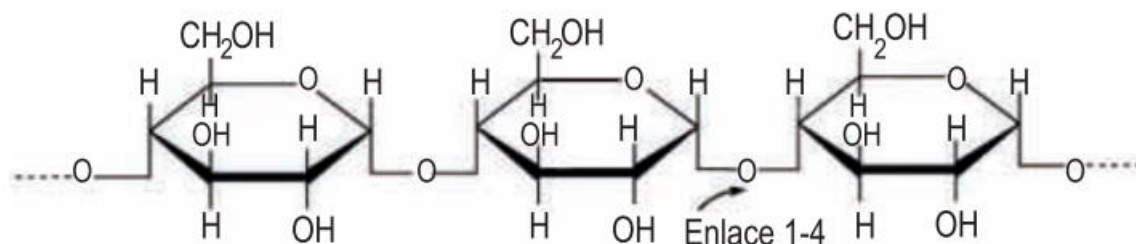
El contenido de amilosa y amilopectina, varía según la fuente botánica, lo que afecta la forma (elongados, elípticos, esféricos o aplanados) y tamaño de los gránulos (Ávila, 2018; Yaruro, 2018); así como las características fisicoquímicas y funcionales, como el poder de hinchamiento, la solubilidad y la susceptibilidad enzimática (Chiranthika et al., 2022; Leonel et al., 2021). En la Tabla 2-1 se presentan las características que presentan los gránulos de algunos almidones de diferentes orígenes. Según el contenido de amilosa, los almidones se pueden clasificar en almidón ceroso, normal y con alto contenido de amilosa (Obadi et al., 2023). Los almidones nativos, como el maíz, el trigo, el arroz y la patata, contienen aproximadamente entre un 20% y un 35% de amilosa. Por otro lado, los almidones cerosos, como el maíz ceroso, arroz ceroso, cebada cerosa, trigo y patata cerosos, solo contienen hasta un 15 % de amilosa. Por último, los almidones ricos en

amilosa se caracterizan por contener más del 40% de amilosa (Cui et al., 2022; Tester et al., 2004).

**Tabla 2-1:** Tamaño de los gránulos, contenido de amilosa y amilopectina de algunas fuentes de almidón. Fuente: (Aristizábal & Sánchez, 2007).

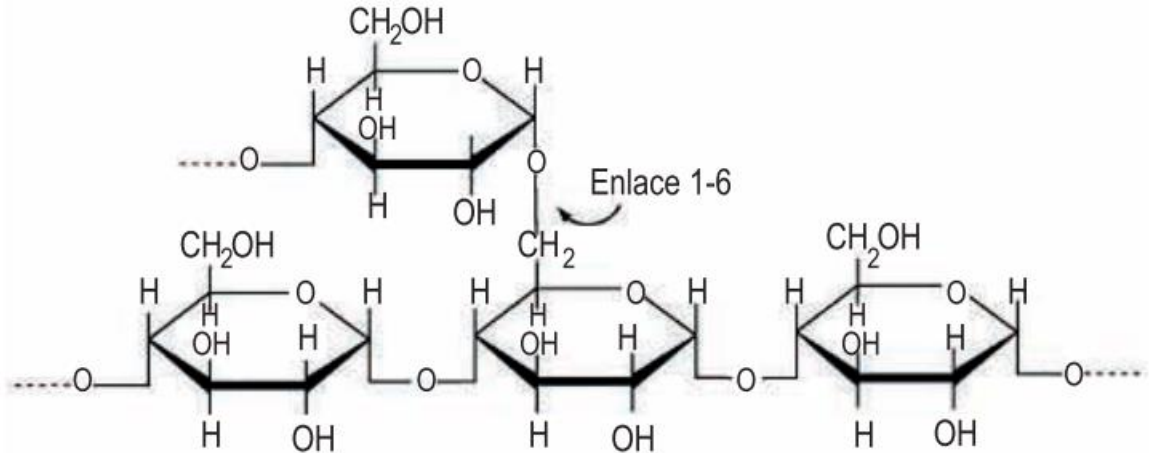
Almidón	Tipo	Morfología	Contenido de amilosa (%)	Contenido de amilopectina (%)
Maíz	Cereal	Redondo poligonal	25	75
Maíz ceroso	Cereal	Redondo poligonal	<1	≈ 99
Yuca	Raíz	Ovalado truncado	17	83
Papa	Tubérculo	Ovalado esférico	20	80
Trigo	Cereal	Redondo lenticular	25	75
Arroz	Cereal	Esférico poligonal	19	81

La amilosa que tiene una estructura lineal con enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1-4) con una forma tridimensional helicoidal y de carácter lipofílico; y la amilopectina presenta una estructura más compleja, ramificada y con enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1-4) que se unen entre sí con enlaces glucosídicos  $\alpha$ -D-(1-6) (Chen et al., 2022; Cui et al., 2022; Mendez et al., 2022; Wang et al., 2023). En la Figura 2-1, se presenta un ejemplo de la organización de la estructura química de la amilosa, mientras que en la Figura 2-2 se ilustra la estructura ramificada de la amilopectina.



**Figura 2-1:** Estructura química de la amilosa. Fuente: (Aristizábal & Sánchez, 2007).

Los gránulos del almidón están formados por capas concéntricas debido a la disposición radial de la amilosa y la amilopectina (Huang et al., 2013; Sun et al., 2021). Estas capas presentan zonas cristalinas, formadas por estructura ordenada de la amilosa y zonas amorfas o parcialmente cristalinas, formadas por la amilopectina (Fuentes et al., 2019; Leonel et al., 2021).



**Figura 2-2:** Estructura química de la amilopectina. Fuente: (Aristizábal & Sánchez, 2007).

Existen diferentes patrones cristalinos en los almidones, siendo los más comunes el patrón de tipo A y el de tipo B (Fuentes et al., 2019). El patrón de tipo A se encuentra en la amilosa y se caracteriza por una organización en hélice, donde las cadenas se enrollan formando hélices que se apilan de manera ordenada. Este patrón es típico de almidones de cereales como el maíz o el trigo (Chen et al., 2017; Xiao et al., 2022). Por otro lado, el patrón de tipo B se encuentra en la amilopectina y se caracteriza por una estructura ramificada, con ramificaciones que se entrecruzan formando una estructura tridimensional. Este patrón es común en almidones de tubérculos como la papa (Chuenkamol et al., 2007; Thitipraphunkul et al., 2003a).

### 2.2.3 Características funcionales

Estas características hacen alusión a los atributos que determinan el comportamiento y utilidad en una amplia gama de aplicaciones industriales y alimenticias. Entre estas características están la capacidad de retención de agua, el poder de hinchamiento, la solubilidad y la formación de geles; características que son fundamentales en la elaboración de alimentos y en la industria, debido a su influencia en la textura, la estabilidad y la calidad final de los productos. Estudiar estas propiedades es crucial para comprender cómo el almidón se comporta en diferentes procesos de fabricación, permitiendo optimizar su uso en la creación de productos alimenticios innovadores y de alta calidad.

La procesabilidad y las propiedades del almidón se ven ampliamente mejoradas mediante el proceso de gelatinización, el cual implica la reducción de la estructura semicristalina de este polímero (Canton et al., 2023). Después de la gelatinización, durante el enfriamiento,

---

tiene lugar la retrogradación, en la cual la amilosa y la amilopectina pierden agua y se reorganizan, resultando en la formación de una pasta viscoelástica, firme y rígida (Kaur et al., 2022; Xie et al., 2023; Zhang et al., 2020). Es importante destacar que las características de gelatinización y retrogradación son propiedades únicas en los almidones. Finalmente, la cristalización ocurre luego del proceso de retrogradación y durante el enfriamiento de las pastas, proceso que ocurre más rápido para la amilosa en comparación con la amilopectina (Chiranthika et al., 2022).

- **Solubilidad:** se define como la capacidad del almidón para disolverse en agua, gracias a que juega un papel determinante en la formación de soluciones viscosas y su participación en procesos culinarios específicos, como la gelatinización. Esta propiedad se encuentra intrínsecamente vinculada a la estructura y naturaleza de las cadenas de glucosa presentes en el almidón (Garnica et al., 2010; Perez & Lares, 2005). Esta característica proporciona información esencial para la optimización de procesos en la industria, con implicaciones directas en la calidad y características de los productos finales (Anderson et al., 1970; Herceg et al., 2010).
- **Capacidad de retención de agua:** es la capacidad del almidón para retener agua en su estructura. Esta propiedad desempeña un papel crítico en la mejora de la jugosidad y textura de productos alimenticios, ejerciendo una influencia significativa en la calidad sensorial de productos específicos, como cárnicos y productos de panadería. El estudio de esta propiedad establece un fundamento técnico para la manipulación precisa de la textura en la formulación de productos (Chiranthika et al., 2022; Mendez et al., 2022).
- **Poder de hinchamiento:** esta propiedad se define como la capacidad del almidón para absorber agua durante el proceso de gelatinización. Su influencia directa en la textura y formación de geles en productos culinarios, tales como salsas y pudines, la convierte en un factor de importancia significativa. La capacidad de hinchamiento depende intrínsecamente de la estructura del almidón y su aptitud para expandirse y absorber agua durante la gelatinización. El conocimiento de esta propiedad proporciona una base técnica para la manipulación precisa de la textura en productos alimenticios, facilitando así la optimización de sus características finales (Herceg et al., 2010; Maldonado et al., 2018; Peroni et al., 2006).



- **Gelatinización:** es el proceso en el cual los gránulos de almidón absorben agua y aumentan su tamaño, rompiendo la estructura semicristalina y formando nuevos enlaces (Canton et al., 2023). La amilosa y la amilopectina se dispersan en la solución, creando la estructura de un gel (Irani et al., 2019; Li et al., 2019; Xie et al., 2023). La gelatinización confiere al almidón mayor susceptibilidad a la digestión por parte del organismo humano, ya que su estructura se vuelve más accesible a las enzimas digestivas, lo que facilita una descomposición eficiente de los polisacáridos en unidades de glucosa más simples. El proceso de gelatinización está caracterizado por la temperatura inicial ( $T_o$ ), en la que comienza la absorción de agua y el hinchamiento del almidón; la temperatura pico ( $T_p$ ), la cual es la temperatura máxima alcanzada durante el proceso; la temperatura final ( $T_f$ ), que indica el punto en el que el almidón ha absorbido la máxima cantidad de agua; y el cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) que es la cantidad total de calor absorbido e informa sobre la energía requerida para el proceso (Canton et al., 2023; Irani et al., 2019). El entendimiento y control de la temperatura de gelatinización son fundamentales para garantizar la eficiencia y consistencia en la producción a gran escala, asegurando la uniformidad de la calidad de los alimentos y facilitando el desarrollo de procesos industriales más eficientes (Aleixandre & Rosell, 2022; Jan et al., 2022; Van & Morita, 2005).
- **Retrogradación:** esta propiedad se define como la tendencia del almidón a formar estructuras más sólidas después del proceso de gelatinización (Xie et al., 2023). Presenta una influencia directa en la textura y consistencia a lo largo del tiempo, particularmente en productos como panadería y alimentos procesados. La retrogradación está intrínsecamente ligada a la capacidad del almidón para reorganizarse molecularmente después de la gelatinización (Hoover, 2001; Saartrat et al., 2005). Un entendimiento detallado de esta propiedad proporcionará una base técnica para la manipulación precisa de la textura y consistencia en productos alimenticios, permitiendo así la optimización de sus propiedades a lo largo de su vida útil (Chibuogwu et al., 2019; Van & Morita, 2005).

Teniendo en cuenta la capacidad de absorción y exudación del gránulo del almidón en suspensiones acuosas, se pueden determinar las características como el índice de agua, poder de hinchamiento y el índice de solubilidad (Aristizábal & Sánchez, 2007). El índice de absorción de agua (IAA) indica la cantidad de agua que puede absorber una muestra

de almidón. Es una propiedad fundamental para aplicaciones en productos donde se busca retener agua, como en productos horneados, rellenos o salsas. El poder de hinchamiento (PH) es una medida del aumento de volumen que sufren los gránulos de almidón al calentarse en solución. El estudio de esta característica es importante para la elaboración de algunos productos como papillas, cremas o postres. Finalmente, el índice de solubilidad en agua (ISA) hace referencia a la capacidad de disolverse en la misma. Un alto índice, es favorable para aplicaciones como espesante, estabilizante o elaboración de recubrimientos (Chiranthika et al., 2022; Garnica et al., 2010; Leonel et al., 2021; Obadi et al., 2023; Perez & Lares, 2005). Además, los altos contenidos de amilosa en almidones permiten una mayor solubilidad y viscosidad del almidón (Aristizábal & Sánchez, 2007). Por otra parte, los almidones con alto contenido de amilopectina, presentan un mayor poder de hinchamiento y una mayor velocidad de cristalización (Chiranthika et al., 2022).

La morfología del gránulo de almidón influye en gran medida en la viscosidad de la pasta, debido a que esta va a depender de la absorción de agua y ruptura de los gránulos (Peroni et al., 2006; Sun et al., 2021). El pH es otro factor que tiene un impacto en la formación de geles de almidón, donde soluciones ácidas forman geles más duros (Cui et al., 2022). Por otra parte, el índice de solubilidad en agua es una medida indirecta del grado de almidón gelatinizado (Garnica et al., 2010).

#### 2.2.4 Propiedades de la pasta

Las propiedades reológicas del almidón se refieren a su comportamiento bajo fuerzas de deformación, especialmente en relación con su flujo y deformabilidad. A su vez, se caracteriza mediante las propiedades como la viscosidad, la elasticidad y la plasticidad. El comportamiento reológico permite clasificar las pastas y determinar su aplicación en la industria alimentaria (Cisneros et al., 2009).

- **Viscosidad:** se define como la resistencia al flujo de una solución de almidón, teniendo un impacto directo en la capacidad del almidón para espesar líquidos y, por ende, en la textura de productos como salsas y productos lácteos. Esta propiedad está intrínsecamente vinculada a la concentración de almidón en la solución y a su habilidad para establecer enlaces entre las moléculas. No obstante, la máxima viscosidad (PV – Peak Viscosity) del almidón representa la capacidad

de formar una estructura viscosa cuando es sometida a procesos de calor y agitación; la descomposición (BD – Breakdown) representa la capacidad del almidón para mantener su estructura de gel mientras es sometido a calor y agitación; y el retroceso (SB – Setback) es la diferencia de la viscosidad máxima y la viscosidad final del proceso de gelatinización, cuando ocurre el enfriamiento (Watcharatewinkul et al., 2009). La determinación precisa de esta propiedad proporciona una sólida base técnica para la manipulación de la viscosidad en formulaciones que incorporan almidón, facilitando así la optimización de la textura y consistencia de los productos finales (Huang et al., 2013; Saartrat et al., 2005; Xiao et al., 2022).

- **Consistencia:** representa la firmeza o cohesión de un producto alimenticio, es esencial para determinar la textura y la experiencia sensorial en productos como cremas y salsas (Lares & Pérez, 2006; Xiao et al., 2022). Esta característica proporciona información clave sobre cómo la interacción entre el almidón y otros ingredientes en la mezcla influye directamente en la consistencia final del producto. El conocimiento de esta propiedad permite ajustar de manera precisa la consistencia en formulaciones alimenticias, facilitando así la optimización de las características sensoriales deseadas en los productos finales (Takahashi et al., 1986; Zhang et al., 2020).
- **Estabilidad del gel:** se refiere a la capacidad del gel para conservar su estructura y forma, y desempeña un papel esencial en productos como jaleas y confitería, donde mantener la forma y textura a lo largo del tiempo es crucial. Esta propiedad está intrínsecamente vinculada a la estructura molecular y la retrogradación del almidón. La comprensión de esta característica proporciona información para la manipulación y mejoraría en la estabilidad de los geles en productos finales. Esto es especialmente significativo en aplicaciones donde la integridad del gel es vital para la calidad y apariencia del producto (Saartrat et al., 2005; Xiao et al., 2022; Xie et al., 2023).
- **Claridad del gel:** La apariencia visual de los geles de almidón adquiere relevancia según su aplicación final. Para evaluar esta característica, se utiliza la medición de la transmitancia que permite determinar la claridad u opacidad de una pasta de almidón (Rostamabadi et al., 2022). Además, esta propiedad se puede relacionar

con la estructura y el tamaño de los gránulos. Éstos a su vez, afectan la absorción de agua y el poder de hinchamiento (Van & Morita, 2005; Yaruro et al., 2021). Esta propiedad óptica es relevante en industrias como la alimentaria y la farmacéutica, donde la claridad y la transparencia son factores críticos.

- **Resistencia al corte:** es la capacidad del producto para oponerse a fuerzas de corte y desempeña un papel crucial en productos de panadería y pastelería, donde preservar la integridad del producto es fundamental. Esta propiedad está directamente ligada a la fuerza de gelificación y la retrogradación del almidón. Esta propiedad permite conocer el comportamiento del almidón en productos horneados y permite ajustar y mejorar la resistencia al corte en formulaciones específicas (Cisneros et al., 2009; Li et al., 2019; Utrilla et al., 2014).
- **Formación de película:** describe la capacidad del almidón para generar películas delgadas y flexibles, y es una propiedad crucial. La habilidad del almidón para formar enlaces fuertes y flexibles es un determinante para optimizar su uso en aplicaciones de recubrimiento y encapsulación en la industria alimentaria, mejorando así la calidad y la estabilidad de los productos finales (Canton et al., 2023; Gutiérrez, 2018; Wang et al., 2022).
- **Digestibilidad enzimática:** se refiere a la susceptibilidad del almidón a la descomposición por enzimas durante la digestión. Este aspecto tiene un impacto directo en el valor nutricional del almidón y en su utilidad en productos diseñados para diversos grupos de consumidores (Aleixandre & Rosell, 2022; Van & Morita, 2005). La capacidad de descomposición del almidón por enzimas depende intrínsecamente de su estructura y de la accesibilidad de las enzimas a los sitios de acción específicos. Esta característica proporciona conocimientos clave sobre la respuesta del almidón a procesos digestivos, lo que es esencial tanto para la evaluación nutricional, como para el desarrollo de productos alimenticios dirigidos a diferentes necesidades dietéticas (Kaur et al., 2007; Kaur et al., 2022).
- **Capacidad de emulsificación:** se refiere a su aptitud para estabilizar emulsiones de líquidos y grasas. Esta capacidad tiene relevancia particular en aderezos y productos cárnicos, donde mejora la estabilidad de las mezclas (Khetu et al., 2022;

Wang et al., 2022). La eficacia de esta propiedad depende de la afinidad del almidón por las fases acuosa y grasa, así como de su habilidad para formar películas alrededor de las gotas de grasa. El estudio de esta característica es fundamental para la formulación de productos que requieren estabilidad en emulsiones, contribuyendo así a la calidad y la textura deseada en productos específicos de la industria (Gupta et al., 2022; Kheto et al., 2022; Singla et al., 2020).

Tanto el contenido de amilosa como el contenido de amilopectina son importantes para la formación de geles. Específicamente, el contenido de amilosa tiene un impacto significativo en la retrogradación, gelatinización, hidrólisis ácida, hidrólisis enzimática y propiedades reológicas de los gránulos de almidón (Fonseca et al., 2017a; Salazar et al., 2021). Es decir, los almidones con alto contenido de amilosa forman geles más resistentes, gracias a que es una molécula con una estructura lineal ordenada, le permite formar enlaces más fuertes con el agua para formar una nueva estructura (Kheto et al., 2022; Sun et al., 2021).

En estudios comparativos de almidones de diferentes fuentes, el almidón de yuca presenta los más altos índices de absorción de agua (IAA), solubilidad (ISA) y poder de hinchamiento (PH), en comparación con almidones de arrurruz, batata y maíz (Hernández et al., 2008; Peroni et al., 2006; Van & Morita, 2005). Sin embargo, los valores reportados son distintos a pesar de estudiar la misma especie. Estas diferencias se asocian a los métodos de cuantificación y las condiciones experimentales, por lo que solo los datos son comparativos en el mismo estudio (Kheto et al., 2022).

Otro aspecto importante para determinar la funcionalidad del almidón es la capacidad de retención de aceite. Cuando un producto presenta una alta capacidad de retener aceite, puede emplearse como ingrediente para estabilizar alimentos con un alto porcentaje de grasa y emulsión (Fuentes et al., 2019).

## **2.3 El almidón de achira (*Canna edulis*)**

### **2.3.1 Generalidades**

El almidón de achira es un tipo de almidón extraído de las raíces de la planta *Canna edulis*, una especie de origen andino que se extendió por Sudamérica desde Venezuela hasta el norte de Chile (Mendez et al., 2022; Zhao et al., 2022). Existen alrededor de 70 especies

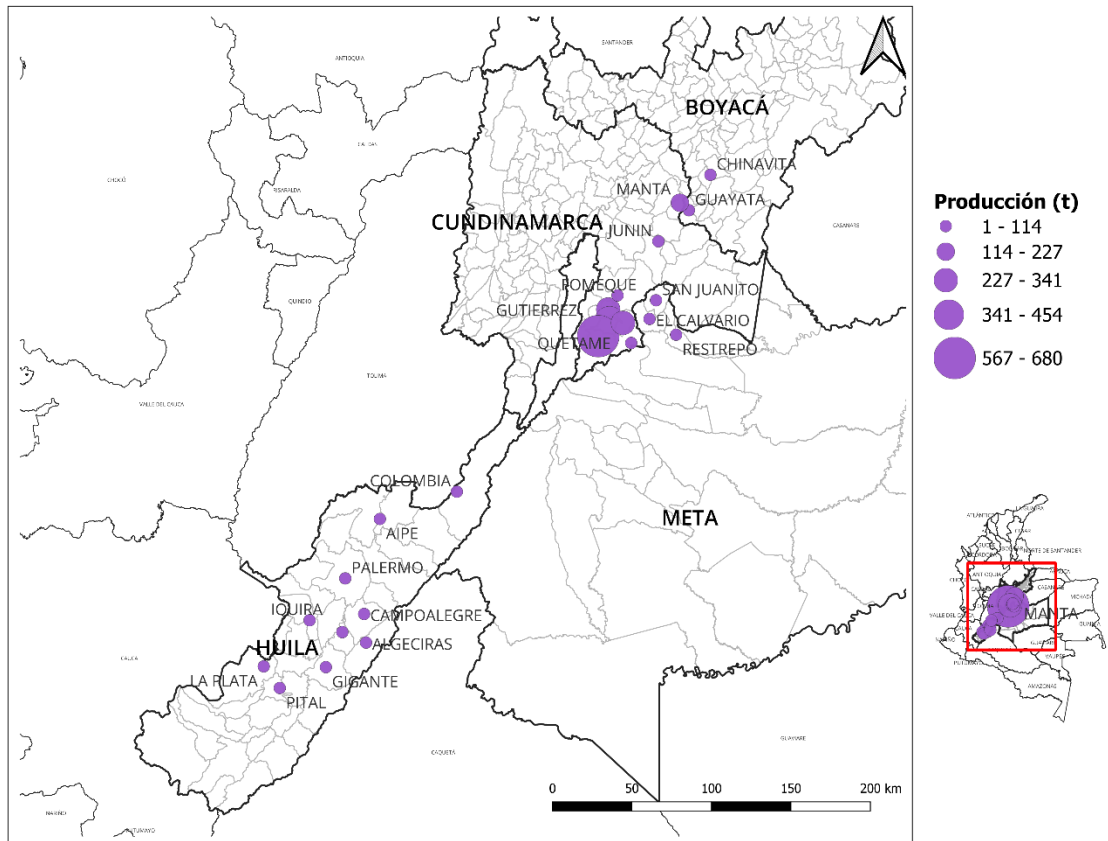
diferentes de plantas de achira (*Canna* spp.) en todo el mundo. Estas especies pertenecen a la familia de las *Cannaceae* y se encuentran principalmente en regiones tropicales y subtropicales (Cisneros et al., 2009; Lobo et al., 2017; Zhao et al., 2022). Las plantas de la familia *Cannaceae*, son plantas con periodo vegetativo corto que pueden llegar a medir 2,5 metros de altura (Lobo et al., 2017) y su cosecha se realiza entre los 6 y 9 meses después de su cultivo (Caicedo, 2004).

Esta planta está compuesta por: rizomas, que presentan raíces pequeñas blancas y cilíndricas; el tallo, que comprende un rizoma subterráneo que desarrolla ramificaciones con vástagos aéreos; las hojas, flores y el fruto, el cual es una cápsula que contiene las semillas (Fuentes et al., 2019; Rodríguez et al., 2003; Salazar et al., 2021). Cada especie puede tener características distintas en términos de tamaño, forma de las hojas, colores de las flores y contenido de almidón. El almidón de achira es el principal componente del rizoma de la planta de achira (*Canna edulis*) alcanzando entre el 70 y 80 % del peso seco del rizoma (Zhang, Wang, & Yang, 2010).

El cultivo de la planta de achira se encuentra en varios países como Australia, India, China, Tailandia, Indonesia, Vietnam, Nigeria, Ghana, México Venezuela, Brasil, Ecuador, Colombia, entre otros (Caicedo, 2004; Piyachomkwan et al., 2002; Zhang et al., 2011; Zhao et al., 2022). Según las cifras de la FAO, la mayor producción de cultivos de raíces (como el taro, el arrurruz, la batata, el sago, la achira, el ñame) en el mundo se concentra en Nigeria con un 38 %, seguido por China con un 25 % y Ghana con un 15 % (FAOSTAT, 2022). En América Latina, los países de México y Perú contribuyen cada uno con el 3 % de la producción total; mientras que Colombia y Venezuela, aportan el 2 % cada uno.

El cultivo de achira en Colombia se ha venido desarrollando de manera artesanal (Caicedo et al., 2003). Las zonas principales de producción de este cultivo se ubican en los departamentos del Huila, Nariño, Cauca (Lobo et al., 2017), Tolima y Cundinamarca (Rodríguez, 2003). Entre las especies que tienen mayor aprovechamiento productivo se encuentran los ecotipos: Nativa I, Verde o Lisa, Maituna I, Blanca de Pasto y Roja de Cáqueza (Caicedo et al., 2003; Maldonado et al., 2018). El 80 % de la producción del almidón de achira en Colombia se destina a productos de panificación, el 15 % a la industria alimentaria y el 5 % restante se emplea en las industrias farmacéutica, textil y papelera (Yaruro, 2018). En Colombia, el cultivo de achira ha experimentado un crecimiento

significativo en su producción, con un valor de 1 500 toneladas en el año 2012 que aumentó a 2 400 toneladas para el 2022 (Minagricultura), situando el 80% de la producción en los municipios de Gutiérrez, Fosca, Quetame, Cáqueza, Manta y Guayabetal, como se representa en la Figura 2-3.



**Figura 2-3:** Mapa de la distribución de la producción de achira en Colombia para el 2022. Elaboración propia.

Dada la gran versatilidad de usos que presentan los almidones, actualmente existe un interés por identificar y caracterizar almidones nativos tropicales o de diferentes fuentes, en busca de propiedades tecno-funcionales novedosas, que permitan satisfacer tanto los requerimientos de la industria como la demanda de ingredientes naturales que ha aumentado por parte de los consumidores (Chiranthika et al., 2022; Cisneros et al., 2009; Gupta et al., 2022; Rostamabadi et al., 2022).

Este estudio proporciona un análisis detallado de las propiedades físicas, químicas, reológicas y funcionales del almidón de achira, así como una evaluación de sus posibles aplicaciones. Además, se lleva a cabo una comparación con dos materiales

agronómicamente prometedores producidos localmente, centrándose en sus características físicas, reológicas y funcionales. El objetivo principal es identificar oportunidades potenciales para la aplicación de estos materiales en la industria, buscando nuevas formas de valorización.

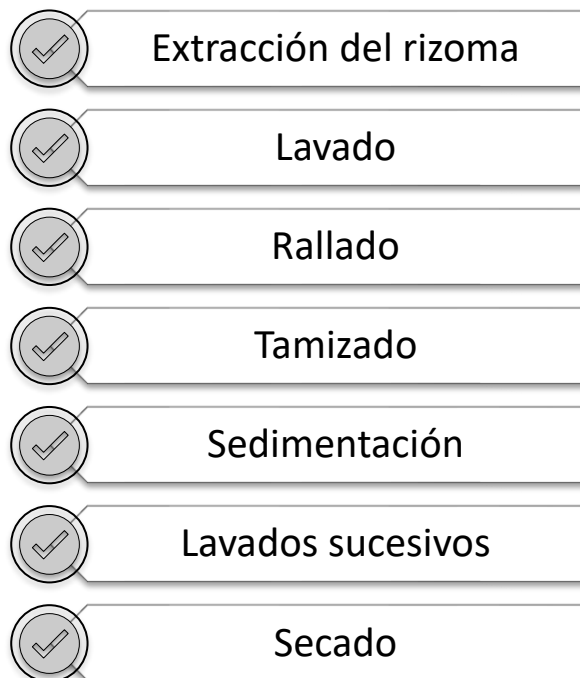
### **2.3.2 Proceso de extracción del almidón**

El almidón se sustrae de los rizomas a partir de un conjunto de técnicas empleadas para separar el almidón presente en el tejido celular de la fuente vegetal (García et al., 2013; Rodríguez et al., 2003). Este proceso de extracción puede variar según la fuente de almidón o la materia prima utilizada. En la Figura 2-4 se pueden observar las diferentes operaciones llevadas a cabo para la extracción de almidón de la achira.

El proceso comienza con la extracción de los rizomas de la planta de achira, seguido de una operación de lavado para eliminar la tierra adherida y demás impurezas presentes. Posteriormente, se rallan con la ayuda de un tambor cubierto de una lámina metálica con púas, rompiendo las paredes celulares de la fibra. El material obtenido contiene el almidón disperso, para lo cual es necesario extraerlo mediante lavados con agua que eliminen el almidón. Posteriormente, a través de un tamiz, se separa la masa retenida, que consiste en el almidón extraído, y el sobrenadante que contiene el almidón.

El producto obtenido es una suspensión de almidón conocida como “lechada”, la cual se deja sedimentar durante una hora para darle tiempo al almidón de decantar. Sin embargo, requiere de lavados posteriores para asegurar que todo el almidón ha sido retirado y se encuentra limpio. Este proceso se realiza en bateas de base trapezoidal invertido, donde se adiciona agua, se mezcla y se agita para romper la estructura sólida que se forma en el fondo del recipiente, se espera que se decante y se retira el sobrenadante conocido como “mancha”. Se realiza esta acción en repetidas ocasiones, para obtener un producto limpio hasta que el agua sea transparente (Rodríguez et al., 2003). Finalmente, el almidón húmedo se dispone comúnmente en paseras para el secado natural.





**Figura 2-4:** Secuencia de actividades para la extracción de almidón de los dos clones de achira. Elaboración propia

### 2.3.3 Composición química

La composición química de los almidones de achira ha mostrado una notable divergencia, como se observa en la Tabla 2-2, a través de los análisis proximales realizados en diversos estudios de la literatura. Adicionalmente, el almidón de achira es considerado como uno de los almidones más digeribles y uno de los alimentos básicos en las regiones tropicales del mundo (Zhang et al., 2010).

El almidón de achira contiene bajos niveles de lípidos, cenizas y proteínas, en comparación con otros almidones de raíz y tubérculos (Thitipraphunkul et al., 2003a). Presenta un contenido de humedad entre el 9 y 18 %, bajos contenidos de lípidos (0,002 – 0,0,9 %); un alto contenido de cenizas en comparación con otros almidones (Thitipraphunkul et al., 2003a; Yaruro et al., 2021); y bajos contenidos de fibra cruda, alrededor de 0,34 % (Yaruro et al., 2021) para la especie *Canna edulis* y el 11,51 % para la especie *Canna indica* (Salazar et al., 2021).

**Tabla 2-2:** Características químicas del almidón de achira (*Canna edulis*).

Origen - Referencia	Amilosa	Amilopectina	Humedad	Cenizas	Lípidos	Proteína	Fibra cruda
Tailandia (Thitipraphunkul et al., 2003a)	19,0 – 25,0 %	75,0 – 81,0 %	9,4 - 10,0 %	0,25 - 0,33 %	0,014 - 0,019 %	0,07 - 0,08 %	NR
Tailandia (Watcharatewin kul et al., 2009)	34,0 %	66,0 %	15 %	0,34%	N.D.	0,07%	NR
Indonesia (Purwitasari et al., 2023)	38,6 %	61,4 %	10,7 %	NR	NR	NR	NR
China (Zhang et al., 2021)	26,9 %	73,0 %	13,1 %	0,36%	0,520%	0,18%	NR
Brasil (Leonel et al., 2002)	33,3 %	66,7 %	9,7 %	0,24 %	0,120 %	0,05 %	0,12 %
Venezuela (Perez & Lares, 2005)	13,8 %	86,2 %	18,2 %	0,32%	0,050%	0,67%	0,34%
Colombia (Yaruro et al., 2021)	21,2 - 31,7 %	68,3 - 78,8 %	13,6 - 14,2 %	0,18 - 0,34 %	0,002 - 0,005 %	0,24 - 0,49 %	NR

**Nota.** NR: no reporta

Teniendo en cuenta la información de la Tabla 2-2, el almidón de achira se caracteriza por tener altos contenidos de amilosa, entre 19 – 38 %. Asimismo, el valor reportado en la literatura puede variar según el origen de la especie estudiada y el grado de madurez del rizoma al ser cosechado (Zhang et al., 2011). Por otra parte, la variación en la composición del almidón puede ser atribuida a la genética vegetal, las condiciones ambientales de cultivo y el proceso utilizado para obtener almidón (Yaruro et al., 2021).

En relación con el contenido de minerales, en almidones el fósforo se considera como el más importante en almidones, ya que éste influye directamente en la susceptibilidad a la formación de la estructura cristalina (Fonseca et al., 2017). La presencia de grupos fosfatos puede ocasionar repulsión electromagnética, impidiendo la unión de la amilopectina y afectando la formación de las pastas (Leonel et al., 2020). De hecho, el almidón de achira se caracteriza por altos contenidos de fósforo (Thitipraphunkul et al., 2003b).

### 2.3.4 Propiedades físicas

El almidón de achira, se caracteriza por tener gránulos de gran tamaño, con un rango de 10 µm a 100 µm (Fuentes et al., 2019; Peroni et al., 2006; Zhang, Wang, & Yang, 2010),

mayores a los encontrados para almidones de arroz (25  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ ) o el de papa (15  $\mu\text{m}$  - 100  $\mu\text{m}$ ) (Chibuogwu et al., 2019). Los gránulos de almidón de achira tienen una forma regular, que generalmente es redondeada, ovalada o en forma de disco, con superficies lisas (Chuenkamol et al., 2007; Watcharatewinkul et al., 2009).

El color del almidón o grado de blancura de este es uno de los parámetros de calidad de los almidones y se expresa mediante un índice. Entre más cercano al 100 %, más blanco y puro es el almidón (García et al., 2013; Kheto et al., 2022) y por lo tanto, mayor diversidad de aplicaciones industriales y culinarias (Montoya & Giraldo, 2010; Wu et al., 2020). El almidón de achira reporta valores superiores al 50 % y cercanos al 90 % (Salazar et al., 2021; Yaruro et al., 2021). La alta blancura del almidón de achira lo hace atractivo para diversas aplicaciones donde se requiere un almidón de alta calidad y pureza.

En relación con su estructura cristalina, el almidón de achira exhibe un patrón cristalino distintivo de tipo B, que se refleja en el patrón de difracción de rayos X. Este patrón de difracción muestra picos característicos en el ángulo  $2\theta$  en la posición  $5,6^\circ$ ,  $17^\circ$  y un doblete que se encuentra entre  $22^\circ$  y  $24^\circ$  (Chuenkamol et al., 2007; Fuentes et al., 2019; Thitipraphunkul et al., 2003a). La cristalinidad del almidón afecta la digestibilidad y aumenta la resistencia a la gelatinización (Jan et al., 2022). Además, el grado de cristalinidad relativa en gránulos de almidón se encuentra entre 17 a 50 % (Leonel et al., 2021). Para el almidón de achira se presenta un bajo grado de cristalinidad, alrededor del 25 y el 35 % (Zhang et al., 2021; Zhang, Wang, & Yang, 2010).

### **2.3.5 Características térmicas**

Entre las propiedades térmicas sobresalen por su importancia la gelatinización, la retrogradación, la estabilidad térmica y la degradación (Chen et al., 2022; Timm et al., 2023). Las propiedades térmicas del almidón están relacionadas con su capacidad de absorber agua e hincharse, formar geles y resistir cambios estructurales y de degradación bajo condiciones de calentamiento. El estudio de estas propiedades es clave para comprender y prever el comportamiento de los almidones durante la cocción, el procesamiento industrial y el almacenamiento, y con ello, optimizar su uso en productos alimentarios y no alimentarios. Estas propiedades se estudian mediante técnicas como la calorimetría diferencial de barrido (DSC) y la reología térmica (Leonel et al., 2021; Zhang, Wang, & Yang, 2010).

**Tabla 2-3:** Propiedades térmicas del almidón de achira (*Canna edulis*).

Origen	$T_o$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)	Referencia
Tailandia	65,8 - 66,8	67,7 - 68,9	70,3 - 71,6	17,6 – 18,4	(Thitipraphunkul et al., 2003a)
Tailandia	67,5	69,6	72,4	19,5	(Chuenkamol et al., 2007)
Tailandia	69,2	71,9	74,8	15,1	(Watcharatwinkul et al., 2009)
Vietnam	67,4	70,8	76,1	14,5	(Van & Morita, 2005)
China	59,7	64,2	71,8	9,5	(Zhang, Wang, & Yang, 2010)
India	64,1	69,8	77,5	11,4	(Aprianita et al., 2014)
Bolivia	61,5	65,6	70,0	15,4	(Fuentes et al., 2019)
Venezuela	58,9	63,61	72,1	9,4	(Perez & Lares, 2005)
Colombia	61,2 - 63,0	63,3 - 65,6	67,6 - 71,1	10,6 - 13,6	(Yaruro et al., 2021)
Colombia	59,2	65,2	73,8	10,9	(Mendez et al., 2022)

**Nota.**  $T_o$  : temperatura inicial,  $T_p$  : temperatura pico,  $T_f$  : temperatura final,  $\Delta H$  : Cambio de entalpia.

Las variedades del almidón de achira exhiben notables diferencias en sus propiedades térmicas como se muestra en la Tabla 2-3. Para las variedades estudiadas en países orientales, se presentan altos valores de la temperatura pico ( $T_p$ ) en comparación con las variedades reportadas en Venezuela y Colombia. De igual manera, el cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) reportado es mayor para las variedades estudiadas en Tailandia, Vietnam y China. Estas diferencias presentadas en los almidones de diferentes regiones pueden atribuirse a diferencias en las condiciones de siembra y/o cultivo; en cambio, las similitudes pueden correlacionarse al origen genético similar (Yaruro, 2018).

La pérdida de la birrefringencia, que es la pérdida de la estructura ordenada del almidón, en la achira inicia comúnmente por encima de la temperatura de 50 °C (Mendez et al., 2022). Además, el margen de temperatura durante el cual se forma la nueva estructura ordenada del gel se ve afectado por la cantidad de agua empleada en el proceso (Hoseney, 1991). Se debe agregar que una elevada temperatura de gelatinización implica una resistencia a este proceso, que puede ser útil para brindar estabilidad a algunos productos durante los procesos de cocción (Leonel et al., 2021); mientras que un alto valor de entalpía

indica que el almidón tiene un alto grado de retrogradación, generando una estructura más sólida y cristalina a lo largo del tiempo (Xie et al., 2023).

### 2.3.6 Propiedades reológicas

La medición y comparación de las características que describen el comportamiento reológico del almidón no resulta fácil, dado que se reportan y utilizan diferentes métodos, condiciones y equipos (Saartrat et al., 2005). De este modo, se emplean diversos instrumentos como el Viscosímetro Brookfield, el Reómetro de Corte y RVA (Rapid Visco Analyzer) (Irani et al., 2019). En general, el almidón de achira se caracteriza por una alta viscosidad (PV), baja descomposición (BD) y una alta retrogradación (Saartrat et al., 2005) como se muestra en la Tabla 2-4. La mayoría de estudios de reología en pastas de almidón de achira, se realizaron mediante un analizador de viscosidad rápido (RVA – Rapid Visco Analyser) (Thitipraphunkul et al., 2003b; Watcharatwinkul et al., 2009; Yaruro et al., 2021; Zhang et al., 2010).

**Tabla 2-4:** Propiedades reológicas del almidón de achira (*Canna edulis*)

Origen	T (°C)	PV	BD	SB	Referencia
Tailandia	71,0	258 RVU	115 RVU	65 RVU	(Thitipraphunkul et al., 2003a)
Tailandia	70,0	140,63 – 154,13 RVU	7,17 – 10,04 RVU	103,67 – 115,75 RVU	(Saartrat et al., 2005)
Tailandia	71,8	158,33 RVU	NR	98,48 RVU	(Chuenkamol et al., 2007)
Tailandia	73,7	145,8 RVU	24,1 RVU	154,6 RVU	(Watcharatwinkul et al., 2009)
Vietnam	69,0	620 BU	20 BU	800 BU	(Van & Morita, 2005)
China	NR	2488 RVU	1716 RVU	419 RVU	(Zhang, Wang, & Yang, 2010)
India	66,2	71,3 cP	36,1 cP	13,1 cP	(Aprianita et al., 2014)
Brasil	69,9	351 RVU	156 RVU	122 RVU	(Leonel et al., 2002)
Brasil	71,2	413 RVU	NR	120 RVU	(Peroni et al., 2006)
Bolivia	61,9	6888 cP	5219 cP	NR	(Fuentes et al., 2019)
Colombia	68,4 - 70,9	13480 - 15606 cP	9513 - 15289 cP	3357 - 4959 cP	(Yaruro et al., 2021)

**Nota.** T: temperatura de gelatinización, PV: Peak Viscosity (viscosidad máxima), BD: Breakdown (Desgloce – Descomposición), SB: Seatback (Caída – Retroceso), NR: no reporta.

La variedad Thai-green reportada en Tailandia, fue estudiada por Chuenkamol et al. (2007), Saartrat et al. (2005) y Thitipraphunkul et al. (2003a), presenta similitudes entre estos autores para los parámetros reportados, especialmente en la viscosidad máxima

(158,53, 154,1 y 173 RVU respectivamente) y en el retroceso (98,48, 115,75 y 100 RVU). Es importante destacar que las condiciones de ensayo fueron las mismas para estos estudios, lo que posiblemente explique la poca dispersión de los resultados. Por otra parte, la variedad Thai-purple estudiada por Thitipraphunkul et al. (2003a), presentó el pico más alto de viscosidad lo que se asoció al menor contenido de amilopectina en comparación con las demás variedades estudiadas.

### 2.3.7 Características funcionales

La Tabla 2-5 resume algunas de las características funcionales del almidón de achira proveniente de diferentes variedades u origen. Sin embargo, la transmitancia es una de las características físicas de mayor importancia para la industria ya que señala la claridad y opacidad de la pasta de almidón (Rostamabadi et al., 2022). Esta característica se puede relacionar con la estructura y el tamaño de los gránulos, por lo cual según la fuente del almidón los valores pueden variar ostensiblemente. Por ejemplo, Garnica et al. (2010) reportan una transmitancia promedio de 72,1% para el almidón de papa; Craig et al. (1989), registra valores entre 60% y 65% para el almidón de trigo, y 41 % para el almidón de maíz; Van & Morita (2005) indican un valor de 46% para el almidón de yuca y Thitipraphunkul et al. (2003a) reportaron una transmitancia del 78% para este mismo almidón.

**Tabla 2-5:** Características funcionales del almidón de achira (*Canna edulis*) a las temperaturas de 60 °C y 90 °C.

Origen	IAA (g/g)		PH (g/g)		ISA (%)		Referencia
	60 °C	90 °C	60 °C	90 °C	60 °C	90 °C	
China	NR		5,22	17,08	9,08	67,22	(Zhang, Wang, & Yang, 2010)
Venezuela	13,39	44,1	14,39	45,10	13,32	18,05	(Perez & Lares, 2005)
Colombia - Morada	4,5	17	5	19,5	2	8	(Yaruro et al., 2021)
Colombia - Nativa Huila	4	36	3,5	40	2,5	11,5	(Yaruro et al., 2021)

**Nota.** IAA: Índice de absorción de agua, PH: Poder de hinchamiento, ISA: Índice de solubilidad en agua, NR: no reporta.

En el caso específico del almidón de achira, se han obtenido diferentes valores de transmitancia en estudios realizados en Japón, donde se reportaron valores de 47% (Van

& Morita, 2005), y en Vietnam, donde se determinaron valores entre el 79% y 82% para algunas variedades (Thitipraphunkul et al., 2003a). En variedades colombianas, los valores de transmitancia reportados oscilan entre 43,09% y 58,59% (Yaruro et al., 2021). Las pastas de almidón se consideran claras cuando su transmitancia supera el 40% (Yaruro, 2018). Esta propiedad óptica es relevante en industrias como la alimentaria y farmacéutica, donde la claridad y la transparencia son factores críticos.

El rango de temperatura comúnmente estudiado se ha establecido entre 60 y 90 °C con intervalos de 10 °C. Como se puede observar en la Tabla 2-5, las diferencias entre las variedades de almidón son bastante amplias en la mayoría de los casos. Para la variedad cultivada en Venezuela, reportó el rango más alto de PH en el almidón de achira (Perez & Lares, 2005), el cual puede asociarse al bajo contenido de amilosa (Van & Morita, 2005); mientras que el mayor ISA fue reportado por Zhang, Wang, & Yang (2010), lo cual relacionaron con la velocidad de lixiviación de la amilosa y a una menor interacción entre cadenas de lípidos y amilosa (Khetu et al., 2022).

Otro aspecto importante para determinar la funcionalidad del almidón es la capacidad de retención de aceite. Cuando un producto presenta una alta capacidad de retener aceite, puede emplearse como ingrediente para estabilizar alimentos con un alto porcentaje de grasa y emulsión (Fuentes et al., 2019). Por ejemplo, para el almidón de achira se reporta un valor de 0,7 en Indonesia (Purwitasari et al., 2023) y un valor 1,8 g/g (Zhang, Wang, & Yang, 2010), mientras que para el almidón de yuca, se reporta un valor de 0,76 g/g (Granados et al., 2014). Para algunas harinas de ahuyama y guandul se indican valores entre 1,24 y 0,97 g/g respectivamente (García et al., 2020).

## 2.4 Aplicaciones del almidón

La industria del almidón es variable y diversificada debido a que existen varias fuentes para la obtención de esta materia prima (Aristizábal & Sánchez, 2007). El almidón es una materia prima que ha sido ampliamente utilizada a lo largo de los años en la industria alimentaria como espesante, gelificante, aglutinante, agente de relleno y adsorbente en la preparación de alimentos (Timm et al., 2023; Yaruro et al., 2021). En estas aplicaciones, el almidón aporta características de solubilidad, viscosidad, hinchamiento, pegado y digestibilidad a las matrices alimentarias a base de almidón (Herceg et al., 2010).

Sin embargo, la industria de alimentos no es el único campo de aplicación de esta importante y versátil materia prima, sino que también ha encontrado amplio uso en industrias no alimentarias como la de adhesivos, bioplásticos, biomédicas, bioetanol, cartón, recubrimientos para alimentos y fármacos, y la industria textil (Digaitis et al., 2022; Kaur et al., 2007; Timm et al., 2023; Vilpoux & Santos, 2023). A continuación, se presenta un resumen de aplicaciones del almidón en las diferentes industrias.

### **2.4.1 Industria alimentaria**

La solubilidad que presentan las macromoléculas que componen el almidón, aportan adhesividad, alta viscosidad y cohesión superficial, a diferentes preparaciones en la industria alimentaria (Kaur et al., 2022). A partir del contenido de amilosa y amilopectina, la temperatura de gelatinización, el comportamiento viscoso y las propiedades térmicas, se define la utilización en esta área (Alvis et al., 2008). Los principales usos del almidón en este sector son como espesante, texturizante, gelificante, estabilizante a la congelación y descongelación, agente emulsionante y encapsulante (Bertolini, 2010; Chen et al., 2022; Garnica et al., 2010). También, se emplea para la elaboración de dextrinas, edulcorantes, jarabes, alimentos funcionales, recubrimientos comestibles (Bertolini, 2010), embutidos, pan, fideos, pasta (Cui et al., 2022; Utrilla et al., 2014), bebidas y alimentos fermentados (Chen et al., 2022). En Colombia, el almidón de achira se emplea principalmente para obtener productos de panadería de manera artesanal, como los bizcochos de achira, el pan de sagú, colaciones y coladas (Lobo et al., 2017; Rodríguez et al., 2003).

### **2.4.2 Industria cosmética**

Se definen los productos cosméticos como preparaciones con requisitos específicos que pueden estar en contacto con la superficie del cuerpo humano (Gupta et al., 2022). Durante la última década, la producción de la industria cosmética se ha enfocado en el marco del objetivo global de desarrollo sostenible (Lourith & Kanlayavattanakul, 2023), debido a la concientización de los consumidores por los efectos perjudiciales de emplear polímeros sintéticos (Gupta et al., 2022). Por este motivo, los consumidores prefieren los cosméticos con ingredientes de origen natural, materiales ecológicos y bio-derivados (Canton et al., 2023). Dentro de las aplicaciones del almidón en esta industria se incluyen su uso como sustituto de talco (Lourith & Kanlayavattanakul, 2023), como biopolímero en la formulación



de aceites corporales, lociones hidratantes jabones líquidos, geles fijadores, acondicionadores, shampoo, mascarillas faciales, entre otros (Canton et al., 2023; Gupta et al., 2022). Una aplicación del almidón se enfoca en los productos cosmeceúticos, los cuales se deriva de la industria cosmética y la industria farmacéutica. Estos productos interactúan con la función biológica de la piel y a menudo requieren menos regulación que los productos farmacéuticos, pero más que los cosméticos convencionales (Gupta et al., 2022).

### **2.4.3 Industria farmacéutica**

El almidón se ha investigado como material importante en la administración de fármacos, gracias a su biocompatibilidad, su origen natural y la eficacia en la lenta liberación de los medicamentos (Sundaram et al., 2022). Por otro lado, se ha estudiado la eficacia del almidón para la bio-sorción de fármacos y su remoción de fuentes hídricas (Priyan & Narayanasamy, 2022). También, se ha empleado en aplicaciones biomédicas como relleno, desintegrante, aglutinante y formulación de compuestos bioactivos (Sundaram et al., 2022).

### **2.4.4 Industria textil**

Dentro de los principales usos en la industria textil se encuentran: el fortalecimiento y mejora de la resistencia de los hilos a la abrasión durante el tejido; el mantenimiento de colorantes y productos químicos empleados en el estampado de telas; como componente para esmaltar y pulir los hilos de coser; y para mejorar la apariencia de las telas luego de procesos de blanqueamiento, coloración o estampado (Radley, 1976). Para esta aplicación, la claridad del almidón es de gran importancia (Bertolini, 2010). Asimismo, se realizan modificaciones para la aplicación en la industria textil como la hidrólisis ácida para obtener un bajo punto de cocción y mejorar la viscosidad (Chen et al., 2017), y la oxidación con hipoclorito para mejorar el encolado y el recubrimiento de superficies (Kuakpetoon & Wang, 2001). Por otro lado, se han empleado hidrogeles a base de almidón para la adsorción de colorantes, teniendo en cuenta que la industria textil es una de las principales industrias que vierten residuos de tintes al medio ambiente (Cui et al., 2022).

### **2.4.5 Industria de papel, cartón y ligantes**

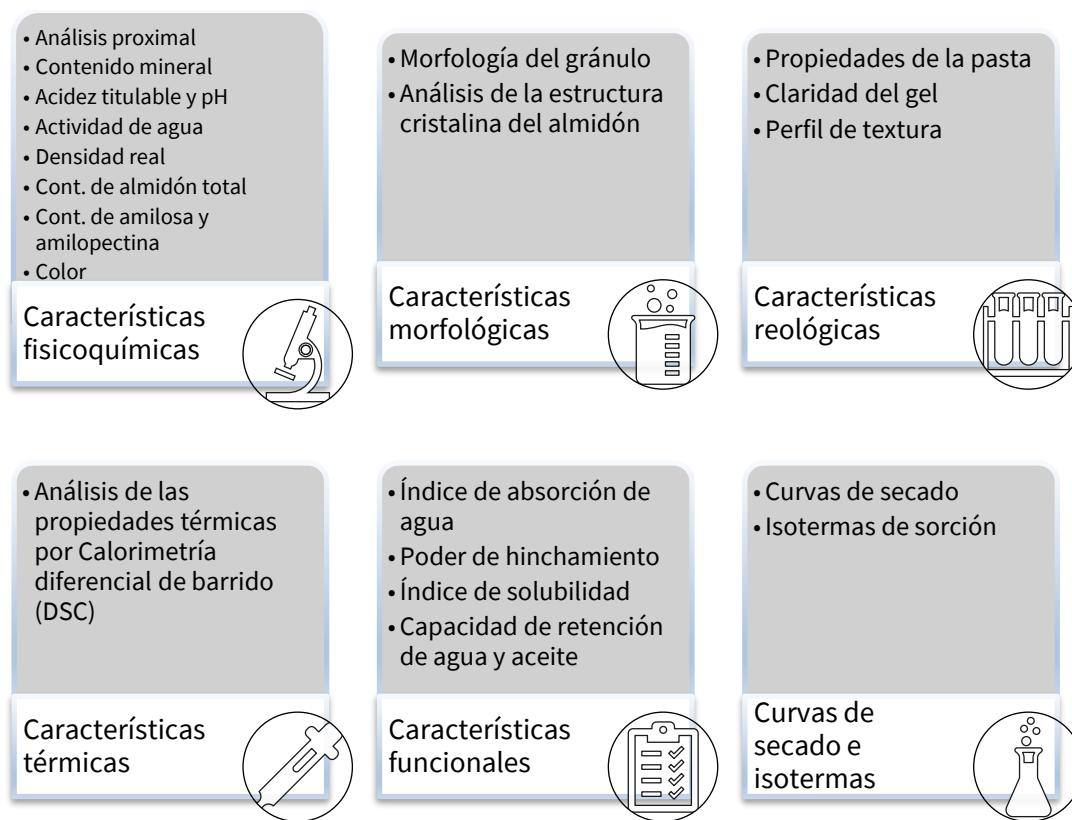
Su principal función es aumentar la resistencia de las hojas debido a que el almidón es un agente de encolado, el cual también mejora la resistencia al estallido, la resistencia al plegado y la resistencia a la tracción, propiedades fundamentales en el papel (Radley, 1976). Con el aumento del costo de la celulosa, los productores han empezado a buscar materiales de menor costo (Bertolini, 2010), por lo que se han empleado almidones modificados con aplicación de hipoclorito (Sánchez & Bello, 2008). Se reporta utilidad del almidón de avena para la industria del papel y de encolados, debido al pequeño tamaño de gránulo y alto contenido de lípidos (Kaur et al., 2022).

### **2.4.6 Otras aplicaciones**

Estas aplicaciones comprenden la elaboración de polímeros biodegradables, materiales termoplásticos, películas solubles como empaques y biocombustibles (Bertolini, 2010). La fabricación de polímeros biodegradables, se ha venido implementando gracias al interés en sustituir los plásticos convencionales como el polietileno y poliestireno (Zamudio et al., 2010). Sin embargo, no se han logrado sustituir a los plásticos usados actualmente por biopelículas, debido a que no se ha logrado un desarrollo comercialmente viable (Singh et al., 2022). Por otro lado, en el campo de la electrónica se emplean biocompuestos con base de almidón en la formación de electrolitos poliméricos con gran aptitud de modificación (Wang et al., 2023). En la industria petroquímica, se han empleado modificaciones físicas del almidón para convertirlo en una matriz más porosa, con el fin de emplearlo como absorbente para la recuperación de acetofenona de efluentes petroquímicos (Chai et al., 2018; Zhou et al., 2021). En la producción de biocombustibles, se considera a las matrices ricas en almidón el principal recurso para la obtención de etanol, además de considerarse como aditivo para la gasolina (OCDE/FAO, 2020).

### **3. Materiales y métodos**

En este capítulo se presenta una descripción de la selección y procedencia de la materia prima objeto de estudio, así como del diseño experimental utilizado en la investigación. Se emplearon diversos métodos para determinar las propiedades del almidón de achira, abarcando un enfoque multidisciplinario. Específicamente, se enfoca en el proceso empleado para la caracterización del almidón de dos clones de achira, considerando aspectos de relevancia en las áreas fisicoquímicas, morfológicas, térmicas, reológicas y funcionales. Asimismo, se llevaron a cabo análisis relacionados con las curvas de secado e isothermas de sorción del almidón, permitiendo una evaluación integral de su comportamiento. Cabe destacar que estos análisis se subdividen en aquellos que se muestran en la Figura 3-1, proporcionando una organización estructurada de la información obtenida.



**Figura 3-1:** Ensayos de laboratorio realizados al almidón de achira (*Canna edulis*). Elaboración propia

### 3.1 Muestreo

En el presente estudio, se evaluaron dos clones de achira seleccionados como materiales vegetales sobresalientes de esta especie en su comportamiento agronómico, potencial de rendimiento y la calidad del almidón, según un estudio realizado por Maldonado et al. (2018) en la Corporación colombiana de investigación agropecuaria – Agrosavia. Este estudio consistió en la realización de una Prueba de Evaluación Agronómica (PEA) sobre cinco clones sobresalientes que se establecieron en los Departamentos de Cundinamarca, Huila y Nariño. A partir de estos hallazgos, se llegó a la conclusión de que el material genético identificado por los investigadores como 2008 – 001 mostró un rendimiento superior en comparación con los otros clones evaluados. Por otro lado, el análisis del material genético designado como 2007 – 006 reveló aspectos favorables en la evaluación, lo que condujo a su selección para un

análisis adicional. Es importante aclarar que el código empleado para nombrar a estos genotipos procede del número de parcela de la cual se extrajo cada material genético (Maldonado et al., 2018).

Teniendo en cuenta los aspectos destacados de los clones 2008 – 001 y 2007 – 006 reflejados en la PEA, se eligieron para realizar un estudio detallado de las características fisicoquímicas, morfológicas, térmicas, reológicas y funcionales del almidón de estos dos clones de achira. El material genético evaluado procede de la accesión de la colección de achira en el banco de germoplasma del Centro de Investigación La Selva – Agrosavia, mediante propagación vegetativa y multiplicada en parcelas experimentales en Cáqueza, Cundinamarca (Altitud: 1746 msnm, temperatura promedio: 21 °C, precipitación media: 1150 mm), para la obtención de la semilla. Posteriormente, se realiza la siembra en el año 2016 en parcelas experimentales de 22.5 m<sup>2</sup> de extensión, en el municipio de La Cruz, Nariño (Altitud: 2370 msnm, temperatura promedio: 20 °C, precipitación media: 1645 mm).

Los rizomas empleados para el presente estudio fueron cosechados en el 2021 y transportados vía terrestre hacia el Centro de Investigación Tibaitatá – Agrosavia en Mosquera, Cundinamarca (Altitud: 2516 msnm, temperatura promedio: 19 °C, precipitación media: 2746 mm). La extracción del almidón se realizó según la metodología expuesta por Rodríguez et al. (2003) (ver sección 2.3.2), utilizando un prototipo a escala de los equipos empleados en campo para la obtener el almidón. Se tomaron fotografías durante el proceso de extracción, las cuales se muestran en la Figura 3-2. Este procedimiento se replicó de manera idéntica para ambos clones, asegurando las mismas condiciones de operación.

El proceso de secado del almidón se llevó a cabo de manera natural, utilizando paseras adecuadas para este fin. Sin embargo, es importante destacar que no se realizaron registros de temperatura y humedad relativa del ambiente durante este proceso. Posteriormente, el almidón seco se empacó en bolsas plásticas transparentes con cierre resellable y se almacenó en estantes en el Laboratorio de Poscosecha de Agrosavia para su conservación.

Se tomaron medidas adicionales para garantizar la integridad de las muestras hasta el momento de los análisis en laboratorio, incluyendo la protección contra la humedad y la contaminación ambiental. Este proceso de empaque y almacenamiento se llevó a cabo de acuerdo con las prácticas estándar de conservación de muestras en el laboratorio, asegurando así la calidad y la integridad de los datos obtenidos durante el análisis posterior.

Se obtuvieron 5 kg de almidón de cada clon de manera representativa del lote total. Después, se mezcló cada muestra minuciosamente para garantizar la homogeneidad del contenido y se cuarteó para asegurar una distribución uniforme de las partículas. Finalmente, se extrajo la cantidad necesaria para cada ensayo con el fin de realizar su posterior análisis y estudio.



**Figura 3-2:** Diagrama de operaciones en el proceso de extracción del almidón de achira. Elaboración propia.

## 3.2 Diseño de la investigación

La metodología empleada en este estudio fue un diseño de investigación descriptivo, compuesto por dos etapas: una revisión bibliográfica y pruebas de laboratorio. El enfoque descriptivo se centró en analizar detalladamente las características y propiedades del almidón de dos clones de achira para comprender su naturaleza y comportamiento. Durante la revisión bibliográfica, se describieron las principales características y aplicaciones del almidón en diferentes industrias, mientras que en la fase de pruebas de laboratorio se evaluaron estas características para los dos clones de achira bajo estudio.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H0: No existen diferencias entre las características físicas, químicas, térmicas, reológicas y funcionales presentadas por los dos clones de achira (2008-001 y 2007-006) que determinen su potencial uso en la industria,

Hi: Existe al menos una diferencia entre las características físicas, químicas, térmicas, reológicas y funcionales presentadas por los dos clones de achira (2008-001 y 2007-006) que determinen su potencial uso en la industria.

El diseño experimental se estructuró en un factor de evaluación con dos niveles, correspondientes a las dos variedades de achira, y se evaluaron un total de 20 características del almidón. Para garantizar la robustez y la fiabilidad de los resultados, se llevaron a cabo pruebas por triplicado, lo que permitió minimizar la variabilidad y aumentar la precisión de las mediciones realizadas. Por otro lado, en los ensayos de laboratorio contratados, se consideró la incertidumbre asociada a los métodos empleados, ya que se analizaron únicamente dos muestras. Esta estrategia permitió complementar y respaldar los hallazgos obtenidos en las pruebas realizadas.

Para el análisis de los datos, se empleó el procedimiento GLM (Generalized Linear Model) para evaluar la influencia de diferentes variables independientes en las variables dependientes. Se aplicó la prueba t de Student para determinar diferencias significativas entre los grupos, estableciendo un nivel de significancia ( $p$ ) menor a 0,05. Para evaluar la consistencia de los resultados, se calculó el coeficiente de variación (CV) y se determinó la desviación estándar de las medidas. El CV se utilizó como medida de la precisión de las mediciones, mientras que la desviación estándar ayudó a cuantificar la dispersión de los datos.

### **3.3 Características fisicoquímicas**

#### **3.3.1 Análisis proximal**

Esta prueba fue realizada por el laboratorio de Química Analítica de la Agrosavia, con acreditación ONAC vigente y código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017. Se determinó cada uno de los parámetros de humedad, cenizas, extracto etéreo (lípidos), proteína y fibra cruda en gramos por cada 100 gramos de muestra y mediante la metodología dispuesta según la norma vigente para cada una. La humedad se determinó por el método gravimétrico y según la norma ISO 6496:2009 - NTC 4888:2000, donde consiste en dejar una muestra a 103°C en un horno de convección forzada durante 24 horas o hasta que el peso no varíe significativamente (NTC, 2015).

El contenido de cenizas se realizó por el método gravimétrico descrito en la norma AOCA 942.05- 2008 Ed. 21 st 2019, consiste en incinerar una porción de la muestra para lograr la completa combustión de la materia orgánica y pesar el residuo obtenido. El extracto etéreo se determinó por el método analítico del estándar AOAC 2003.06- 2006 Ed. 21 st 2019, que consiste en la extracción de los componentes lipídicos de la muestra, por el principio de arrastre con un solvente adecuado. Finalmente, se cuantifica el contenido obtenido al eliminar el solvente (AOAC, 2019).

El contenido de proteína se calculó según el método analítico de la norma AOCA 960.52- 2008 Ed. 21 st 2019, el cual se basa en una digestión con ácido sulfúrico de la muestra, para una posterior alcalinización y liberación del amoníaco mediante una destilación y titulación. Posteriormente, se cuantifica el contenido de nitrógeno y se multiplica por un factor de conversión (AOAC, 2019). La fibra cruda se determinó teniendo en cuenta el método analítico descrito en la norma ISO 6865:2000 - NTC 5122:2002 que se determina a partir de una pérdida de masa a partir de una reducción a cenizas del residuo de una digestión ácida y alcalina (NTC, 2015).

#### **3.3.2 Contenido mineral**

Esta prueba fue contratada para ser desarrollada por el laboratorio de Química Analítica de la Corporación Agrosavia, con acreditación ONAC vigente y código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017. Se determinaron los siguientes minerales:



Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Azufre (S), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Boro (B). Los minerales como el Na, K, Mg, Ca, Fe, Cu y Zn se determinaron mediante la mineralización de la muestra de almidón en una mezcla de ácidos nítrico y sulfúrico, mediante un espectrómetro de absorción atómica (Przetaczek et al., 2019). La cantidad de nitrógeno presente en la muestra fue determinada por el método volumétrico de Kjeldahl según el método AOAC 945.56 (Aristizábal & Sánchez, 2007). Finalmente, los minerales restantes se calcularon por el método de espectroscopía de emisión de plasma inductivamente acoplado ICP – OES, con previa digestión ácida. El valor obtenido de los minerales se expresa en términos porcentuales (ppm).

### 3.3.3 Acidez titulable y pH

Esta prueba se llevó a cabo en el Laboratorio de Poscosecha de Agrosavia, utilizando un potenciómetro. Se determinó el potencial de iones de hidrógeno en una solución lechosa de almidón y expresar la acidez en gramos de ácido por mililitro, utilizando el método volumétrico de acidez titulable según lo descrito en la norma NTC 440 (2015). Para la prueba, se prepararon soluciones de almidón al 20% en relación masa-volumen. La solución se mantuvo agitada mientras se tituló con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.3, marcando el punto final de la titulación. Se registró el volumen de NaOH consumido, teniendo en cuenta los miliequivalentes de ácido láctico de acuerdo con el procedimiento metodológico descrito por Aristizábal & Sánchez (2007). La determinación de la acidez se realizó en unidades de gramos de ácido por mililitro mediante la aplicación de la siguiente fórmula (ver Ecuación ( 3.1)):

$$Acidez \left( \frac{g}{100ml} \right) = \frac{V_1 \times N \times me}{V} \quad (3.1)$$

### 3.3.4 Actividad de agua

Esta prueba fue realizada en el Laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, por medio de un medidor de actividad de agua de mesa, marca HygroLab C1 (Precisión:  $\pm 0.008$  AW). Este dispositivo determina la actividad de agua mediante el principio de medición dieléctrica. Para la prueba, se colocó una muestra en un cilindro plástico de 3 cm de diámetro y 1 cm de altura, llenando el cilindro hasta la mitad de su altura y posicionando la sonda de medición sobre la muestra.

Se registraron los valores de actividad de agua de la muestra y la temperatura de cinco determinaciones para cada almidón del clon achira (Fan et al., 2016; Montoya López & Giraldo Giraldo, 2010; Tien, 2019).

### 3.3.5 Densidad real

Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia y se empleó un picnómetro de helio (Automatic True Density Analyser – Densi 100/3P Instruments). El principio de medición del método es volumétrico y el equipo consiste en dos recipientes metálicos de volumen estable, donde uno se llena con helio (He), un fluido de densidad conocida y el otro se llena con la muestra de almidón de achira seco (CHbh clon A = 14 % - CHbh clon B = 16 %). El recipiente de la muestra se llenó hasta el 80% del volumen y se registró el peso, luego se tapó el recipiente, se introdujo en el equipo y se selló. En el instrumento se introdujo digitalmente el peso de la muestra de almidón y se comenzó la inyección del He en ambos recipientes. Finalmente, se determinó el volumen del gas ocupado en la muestra de almidón y se calculó la densidad real de la muestra. Estas mediciones se tomaron por triplicado.

### 3.3.6 Contenido de almidón total

Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Poscosecha de Agrosavia siguiendo la metodología empleada en la norma AOAC 996.11 (1997). La prueba consiste en dispersar el almidón en un medio acuoso, luego realizar una hidrólisis enzimática parcial para obtener glucosa. Inicialmente, se desdobló el almidón mediante  $\alpha$ -amilasa a 100°C durante 5 minutos y luego se completó la hidrólisis con amiloglucosidasa a 50°C durante 30 minutos (Zamudio et al., 2010). La solución resultante fue sometida a filtración utilizando papel Whatman N°1, luego se diluyó en agua de calidad Mili-Q y se empleó el reactivo Human para cuantificar el contenido de almidón. Estas soluciones se mantuvieron en un baño maría a 37 °C durante 5 minutos antes de sembrarlas en triplicado en una placa. La cuantificación del almidón total se llevó a cabo mediante la medición de la absorbancia a 500 nm de las muestras, utilizando un lector de placas (Lector Multi-Modal de Microplacas Synergy™ HTX, marca BioTek). El contenido de almidón se calculó utilizando la siguiente ecuación (3.2):

$$\% \text{ Almidon} = \frac{\left( \text{Lectura} \frac{\text{g}}{\text{ml}} \right) (FD) (50 \text{ ml}) (0,900)}{W} \times 100 \quad (3.2)$$

Donde:

Lectura g/ml = Concentración interpolada de la curva de calibración del almidón expresada en g/ml.

FD = Factor de dilución (10)

50 ml = Transferencia del contenido del tubo al balón aforado de 50 ml.

0,900 = Factor de conversión de glucosa a almidón.

W = Peso de la muestra de muestra en gramos.

### 3.3.7 Contenido de amilosa y amilopectina

Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Poscosecha de Agrosavia y se determinó el contenido de amilosa por medio del método colorimétrico yodo-amilosa según la norma del ISO 6647 (Aristizábal & Sánchez, 2007) y el contenido de amilopectina por diferencia. Se preparó una curva estándar utilizando patrones conocidos de amilosa y amilopectina (Amylose from potato – SIGMA, Amylopectin from potato starch – SIGMA). Para determinar el contenido de amilosa en las muestras de almidón de achira, se pesaron 100 mg de almidón de cada clon por triplicado, se añadió 1 mL de etanol (95%) y 9 mL de hidróxido de sodio (1N), seguido de un calentamiento en baño maría a 80 °C durante 10 minutos. Luego, se agregaron 2 mL de NaOH (0.009N) y se completó el volumen a 100 mL con agua destilada. Después de preparar las soluciones, se tomaron 2.5 mL de cada una, se añadieron 0.5 mL de ácido acético (1N) y 1 mL de solución de yodo (2%). Las muestras se almacenaron en la oscuridad durante 20 minutos (Aristizábal & Sánchez, 2007; Purwitasari et al., 2023). Posteriormente, se realizaron siembras de 200 µL por triplicado en una placa y se midió la densidad óptica a una longitud de onda de 620 nm utilizando un Lector Multi-Modal de Microplacas Synergy™ HTX de marca BioTek. El contenido de amilosa se determinó a partir de la curva estándar y se expresó como porcentaje, mientras que el contenido de amilopectina se calculó utilizando la ecuación (2.3) (Aristizábal & Sánchez, 2007):

$$\% \text{ Amilopectina} = 100 - \% \text{ amilosa} \quad (3.3)$$

### 3.3.8 Color

Esta prueba se realizó en el laboratorio de Poscosecha de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia con ayuda de un medidor portátil de colorimetría CR-400 de la marca Konica Minolta. El color se evalúa en función de los parámetros del espacio tridimensional CIELab, donde  $L^*$  representa la luminosidad,  $a^*$  la posición coordenada entre el color rojo y verde, y  $b^*$  corresponde a una posición entre el color azul y amarillo (Purwitasari et al., 2023). Para el ensayo, se utilizó un recipiente cilíndrico con de 4 cm de diámetro y 1 cm de altura, en el cual se colocaron las muestras de almidón seco (Contenido de humedad en base húmeda, clon 2008 – 001 = 14 % y clon 2007 – 006 = 16 %) formando una superficie uniforme con un espesor de capa de 0.5 cm. Se extrajeron tres muestras representativas de cada uno de los clones de almidón, y se tomaron 5 datos (mediciones) por muestra. A partir de la media de los parámetros de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , se obtuvo el índice de blancura por medio de la siguiente ecuación (Yaruro al., 2021) (ver Ecuación (3.4)).

$$IB (\%) = 100 - \sqrt{((100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2})} \quad (3.4)$$

## 3.4 Características morfológicas

### 3.4.1 Morfología del gránulo

Este análisis se contrató en el Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido del Departamento de Geología de la Universidad Nacional de Colombia, que cuenta con un microscopio electrónico de barrido QUANTA 200 marca FEI con detectores de electrones secundarios y electrones retrodispersados y espectroscopía EDAX. La metodología empleada es observacional y analítica. Los parámetros empleados para el desarrollo del ensayo, se basaron en la información descrita por Purwitasari et al (2023). Se llevaron 3 g de cada clon a evaluar al laboratorio y, posteriormente, las muestras fueron preparadas para su observación mediante un equipo de recubrimiento metálico de oro y de evaporación de carbono. Las muestras fueron observadas con aumentos de 200x, 500x y 2000x, con un potencial de 20 kV.

### 3.4.2 Análisis de la estructura cristalina

Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia. El equipo empleado para la determinación fue un Difractómetro de rayos X marca PANalytical modelo X'PERT PRO MPD. La metodología empleada se basó en los parámetros descritos por Cui et al. (2022) y Purwitasari et al. (2023), siendo un método analítico. El rango de barrido para  $2\theta$  fue de  $10^\circ$  a  $90^\circ$ , con un tamaño de paso de  $0,0225^\circ$  y durante 80 segundos por paso, empleando un voltaje de 45 kV y una corriente de 40 mA. Se reportaron las gráficas del patrón de difracción de los almidones, con los picos de cristalización alcanzados en el ángulo  $2\theta$ . Estas gráficas se analizaron por medio del software X'-Pert High Score Plus, que permitió identificar las posiciones de los picos de cristalización y el porcentaje de cristalinidad que presentan las muestras de almidón.

## 3.5 Características térmicas

Esta prueba se realizó a partir del ensayo de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional. Se utilizó un Analizador Calorimétrico DSC 1-500/2722 de marca Mettler Toledo equipado con una estación de datos de análisis térmico. La metodología empleada en el análisis es una técnica analítica que se fundamenta en la medición de las alteraciones de calor absorbido o liberado por una muestra en relación con la temperatura. Para este caso, se aplicaron los parámetros previamente definidos por Mendez et al. (2022). Las muestras se prepararon con una concentración del 10 % p/p en agua destilada y se sometieron a una rampa de calentamiento desde  $25$  a  $120^\circ\text{C}$ , a una velocidad de calentamiento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  en una atmósfera de nitrógeno. Este enfoque analítico permitió determinar los picos endotérmicos, incluyendo la temperatura de inicio de la gelatinización ( $T_o$ ), la temperatura de la máxima gelatinización ( $T_p$ ), la temperatura de fin de la gelatinización ( $T_c$ ) y la entalpía del proceso ( $\Delta H$  en Joules por gr de almidón seco).

## **3.6 Características reológicas**

### **3.6.1 Propiedades de la pasta**

Este ensayo se llevó a cabo utilizando un Viscoamilógrafo de Brabender en la sede Nataima de Agrosavia. El método aplicado en esta prueba se basó en el concepto de viscoelasticidad y en la medición de la viscosidad en función del tiempo y la temperatura, mientras una muestra de almidón se sometía a un esfuerzo cortante controlado. Se prepararon suspensiones de almidón con una relación de 8 % (p/p). Estas se equilibraron a 40 °C por 1 min, luego se calentaron hasta 95 °C con una tasa de calentamiento de 1,5 °C/min. Se mantuvieron a esta temperatura durante 20 minutos. Posteriormente, se enfriaron hasta 50 °C a una tasa de 1,5 °C/min. El ensayo se realizó a una velocidad constante de 160 rpm (Saartrat et al., 2005; Van & Morita, 2005). A través de este ensayo, se determinaron los valores de temperatura y torque correspondientes al inicio de la gelatinización, la viscosidad máxima, la consistencia y el asentamiento de las muestras de almidón provenientes de dos clones de achira (Hernández et al., 2008).

### **3.6.2 Claridad del gel**

Esta prueba se llevó a cabo en los laboratorios de Poscosecha y Biología Molecular de Agrosavia. Se aplicó una metodología espectrofotométrica en la cual se utiliza el agua como patrón de referencia. Se prepararon soluciones de almidón al 1% de masa-volumen en agua, que fueron calentadas a temperatura de ebullición durante 30 minutos con agitación vigorosa cada 5 minutos para lograr pastas de almidón homogéneas. Posteriormente, se enfriaron y se colocaron en una celda de medición para determinar la transmitancia en un espectrofotómetro a 650 nm. Cada muestra de almidón de achira se analizó por triplicado (Craig et al., 1989).

### **3.6.3 Perfil de textura**

Esta prueba fue realizada en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICTA) con la asistencia de un texturómetro TAXT Plus de Stable Microsystems. La metodología empleada implicó la preparación de pastas en el laboratorio de Química de la Universidad, utilizando una proporción de 24 g de almidón y 300 g de agua (8 %). Durante la formación de la pasta, se mantuvo una temperatura constante de 80°C y una agitación continua

mediante un reactor y un agitador mecánico. Los geles resultantes se colocaron en cajas Petri y se almacenaron a 4 °C durante 24 horas (Hedayati & Niakousari, 2018). Posteriormente, las muestras se trasladaron al laboratorio para su análisis, donde se extrajeron cilindros con una base de 22 mm y una altura de 13 mm. Estos cilindros se sometieron a compresión utilizando un émbolo con un diámetro superior al doble de la muestra. El ensayo se llevó a cabo a una velocidad de 2 mm/s con un recorrido igual al 50% de deformación de la muestra.

## 3.7 Características funcionales

### 3.7.1 Índice de absorción de agua

Esta prueba se llevó a cabo en el laboratorio de Poscosecha de Agrosavia, siguiendo la metodología descrita por Anderson et al. (1970). La metodología empleada se fundamenta en un enfoque gravimétrico, en el cual se prepararon soluciones con una concentración del 4% en términos de masa-volumen y se sometieron a un proceso de calentamiento constante durante un periodo de 30 minutos. Los análisis se realizaron por triplicado para cada muestra de almidón de los diferentes clones de achira, y se llevaron a cabo a temperaturas de 60, 70, 80 y 90 °C, respectivamente. Posteriormente al proceso de calentamiento, las muestras fueron sometidas a una centrifugación a 4900 rpm durante 30 minutos a temperatura ambiente. El peso de la fase sólida resultante de la solución se registró como el “peso del gel”. El índice de absorción de agua se determina mediante la aplicación de la ecuación ( 3.5), la cual refleja la capacidad de los gránulos de almidón para absorber agua (Aristizábal & Sánchez, 2007; Purwitasari et al., 2023)

$$IAA = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad ( 3.5)$$

### 3.7.2 Poder de hinchamiento

Este análisis se llevó a cabo en el laboratorio de Poscosecha de Agrosavia mediante la técnica descrita por Anderson et al. (1970). La metodología empleada, que es de naturaleza gravimétrica, consistió en preparar soluciones al 4% en relación masa-volumen y mantenerlas en un baño de calentamiento constante durante 30 minutos a temperaturas de 60, 70, 80 y 90 °C. Luego del proceso de calentamiento, las muestras se sometieron a

una centrifugación a 4900 rpm durante 30 minutos a temperatura ambiente. A continuación, se separó el sobrenadante y se procedió a secarlo durante 12 horas a 70 °C para su posterior pesaje, lo que se denomina “peso de solubles”. Por otro lado, se registró el peso de la parte sólida de la solución, conocido como “peso del gel”. El poder de hinchamiento se calcula mediante la aplicación de la ecuación ( 3.6), la cual evalúa la capacidad de los gránulos de almidón para expandirse o hincharse en respuesta a la absorción de agua (Aristizábal & Sánchez, 2007; Purwitasari et al., 2023).

$$PH = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)} - \text{Peso de solubles (g)}} \quad (3.6)$$

### 3.7.3 Índice de solubilidad

El análisis del índice de solubilidad se llevó a cabo en el laboratorio de Poscosecha de Agrosavia, siguiendo la técnica descrita por Anderson et al. (1970). Esta metodología, que se basa en un enfoque gravimétrico, consistió en preparar soluciones al 4% en relación masa-volumen, las cuales fueron sometidas a un baño de calentamiento constante durante 30 minutos a temperaturas de 60, 70, 80 y 90 °C. Tras el período de calentamiento, las muestras se centrifugaron a 4900 rpm durante 30 minutos a temperatura ambiente. Luego, se procedió a separar el sobrenadante, que se secó durante 12 horas a 70 °C para su posterior pesaje (peso de solubles). El índice de solubilidad se calcula mediante la aplicación de la ecuación ( 3.7), la cual evalúa la capacidad de los gránulos de almidón para disolverse en agua en función de la temperatura (Aristizábal & Sánchez, 2007; Purwitasari et al., 2023).

$$ISA = \frac{\text{Peso de solubles (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100 \quad (3.7)$$

### 3.7.4 Capacidad de retención de agua y aceite

Este ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de Poscosecha de Agrosavia con el propósito de cuantificar la absorción de agua y/o aceite por parte de la muestra de almidón a temperatura ambiente, empleando un método gravimétrico. Inicialmente, se prepararon muestras con una concentración del 1% en relación masa-volumen tanto en agua como en



aceite mineral. Cada muestra se replicó por triplicado para los dos clones de achira. Posteriormente, se sometieron a un proceso de centrifugación a 3000 rpm durante un período de 30 minutos para determinar la fracción de almidón que se solubilizó en la muestra. Finalmente, se procedió a decantar el sobrenadante y a registrar el peso de los tubos drenados que contenían el gel formado. Los valores de la Capacidad de Retención de Agua (CRA) y la Capacidad de Retención de Aceite (CRL) se calcularon mediante las ecuaciones ( 3.8) y ( 3.9) correspondientes (García et al., 2020; Guízar Miranda et al., 2008; Purwitasari et al., 2023):

$$CRA = \frac{\text{Peso del gel solubilizado en agua (g)} - \text{Peso de la muestra (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad (3.8)$$

$$CRL = \frac{\text{Peso del gel solubilizado en aceite (g)} - \text{Peso de la muestra (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad (3.9)$$

## 3.8 Curvas de secado e isotermas de sorción

### 3.8.1 Curvas de secado

Estas pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Poscosecha de Agrosavia, utilizando el almidón húmedo obtenido después del proceso de lavado y antes de la etapa de secado solar. Para ello, se empleó un horno de convección forzada de la marca Memmert, modelo UNB 500, junto con recipientes rectangulares de aluminio. En cada experimento, se pesaron con precisión 100 g de almidón húmedo utilizando una balanza OHAUS con una incertidumbre de  $\pm 0.005$  g. La capa de almidón en los recipientes no excedió los 10 mm de espesor, como se ilustra en la Figura 3-3.

Las muestras se evaluaron por duplicado, debido a la disponibilidad limitada de material, a temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C, todas por debajo de la temperatura de gelatinización del almidón. Durante el proceso de secado, se registró el peso de las muestras inicialmente cada 15 minutos durante la primera hora, y luego cada 30 minutos durante las siguientes dos horas. Finalmente, se realizó una medición de peso cada hora hasta que se alcanzó un punto donde el peso de la muestra se mantuvo constante. Este último punto indicó la finalización del proceso de secado.



**Figura 3-3:** Muestras de almidón para las curvas de secado. Elaboración propia

### 3.8.2 Isotermas de sorción

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Transmisión de Calor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, utilizando un horno de convección forzada de 240 litros de capacidad, modelo FD 240-230V, fabricado por Binder. La metodología empleada se basó en un método gravimétrico conforme a la norma DIN 50008. Para evaluar las isotermas de sorción, se utilizaron ocho soluciones saturadas (KCl, NaCl, NaNO<sub>2</sub>, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, MgCl<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>COOK, LiCl) como medios de sorción, a temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C.

Para cada ensayo, se pesaron con precisión 0.5 g de almidón sobre un vidrio reloj de 30 mm utilizando una balanza analítica. Posteriormente, cada muestra se colocó en canastillas metálicas y se sumergió en un recipiente de vidrio conteniendo la respectiva solución de análisis, asegurando que la muestra no tuviera contacto directo con el líquido. Para cada clon de almidón, se realizaron tres repeticiones de este proceso para cada solución. Se registraron los pesos de las muestras a lo largo del tiempo y se determinó el contenido de humedad inicial de la muestra.

Las muestras se dispusieron de acuerdo con lo ilustrado en la Figura 3-4, dentro de recipientes sellados. Finalmente, se generaron gráficos que representaban el contenido de humedad en equilibrio en función de la actividad de agua.



**Figura 3-4:** Montaje experimental de las isotermas de sorción. Elaboración propia

Para el ajuste de los datos obtenidos en este ensayo, se seleccionaron tres modelos matemáticos ampliamente utilizados en el estudio de almidones (Choque-Quispe et al., 2019; Montes et al., 2009). Estos modelos incluyen el modelo de Oswin (Ecuación ( 3.10)), el modelo de GAB (Ecuación ( 3.11)) y el modelo de Smith (Ecuación ( 3.12)). Finalmente, la evaluación del modelo matemático que presentó mejor ajuste, se realizó mediante la prueba de la Suma de Cuadrados.

$$X_e = A \left( \frac{A_w}{1 - A_w} \right)^B \quad (3.10)$$

$$X_e = \frac{A_w X_m C K}{(1 - K A_w)((1 - K A_w) + (C K A_w))} \quad (3.11)$$

$$X_e = k_1 - k_2 \ln(1 - A_w) \quad (3.12)$$



## 4. Resultados y análisis

En este capítulo, se exponen los resultados de la investigación, comenzando con una descripción visual del almidón de los dos clones de achira. A continuación, se presentan y discuten las propiedades analizadas, así como las posibles aplicaciones del almidón estudiado. Se incluyen los resultados de las características fisicoquímicas, morfológicas, térmicas, reológicas y funcionales, así como las curvas de secado e isothermas de sorción. Estos datos se muestran mediante tablas, gráficos y figuras, además de incluir medidas estadísticas como la media y la desviación estándar.

Adicionalmente, se analizan los valores encontrados, las diferencias significativas entre las muestras analizadas y se lleva a cabo una comparación con los valores previamente reportados para el almidón de achira y almidones de fuentes más comunes, como el almidón de maíz o de yuca. Por último, se exploran las posibles aplicaciones del almidón evaluado, teniendo en cuenta los requisitos específicos de diversas industrias.

### 4.1 Muestreo

Los almidones empleados en los análisis se muestran en la Figura 4-1. Éstos fueron seleccionados de acuerdo con los parámetros descritos en el Capítulo 3 (ver sección 3.1) y extraídos siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 2 (ver sección 2.3.2). Es importante destacar que el almidón de achira del clon 2007 – 006, representado en la Figura 4-1 (a), presenta algunas partículas con una tonalidad oscura, que se asocian con el origen de los rizomas. Mediante un análisis de composición elemental, se determinó que estas partículas están compuestas principalmente por silicio (Si).

Durante el proceso de decantación, se observó que las partículas adicionales, debido a su mayor densidad, se decantaron en primer lugar, lo que dificultó la separación de las partículas de almidón. El proceso de extracción para ambos almidones se llevó a cabo bajo las mismas condiciones de operación. No se realizó una separación física de estas

partículas, ya que involucraría múltiples factores que podrían influir en los resultados obtenidos. Esta particularidad resulta en una diferencia visual notable en el almidón del clon 2007 – 006, que se presenta más oscuro, en comparación con el almidón del clon 2008 – 001.



(c) Clon 2008 – 001

(c) Clon 2007 – 006

**Figura 4-1:** Aspectos de los clones de almidón de achira estudiados.

## 4.2 Características fisicoquímicas

### 4.2.1 Análisis proximal

Los resultados del análisis proximal del almidón de achira se presentan en la Tabla 4-1. El contenido de humedad de los almidones analizados es inferior al 20 %, cumpliendo así con los estándares establecidos por la Norma Técnica Colombiana (NTC 3228). Estos valores son consistentes con los reportados para cuatro especies de almidón de achira en Colombia, que oscilan entre 13,58 y 14,22 % (Yaruro et al., 2021). Por otro lado, se han registrado valores más bajos para variedades de achira en Tailandia (9,39 – 10,02 %) (Thitipraphunkul et al., 2003a), China (13,07 %) (Zhang et al., 2021) e Indonesia (10,7 %) (Purwitasari et al., 2023). Se observaron diferencias significativas entre las medias del contenido de humedad de los clones de almidón de achira analizados. Es importante resaltar que estos valores se pueden atribuir al proceso de secado durante la extracción y las condiciones de almacenamiento (Digaitis et al., 2022). Específicamente, se plantea que

las variaciones en el contenido de humedad influirán directamente en la actividad de agua y en el comportamiento de sorción de humedad de los clones de almidón.

**Tabla 4-1:** Resultados del análisis proximal del almidón de los clones de achira estudiados.

Almidón de achira	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006
Humedad (g/100g)	14,69 ± 0,35a	16,44 ± 0,40b
Cenizas (g/100g)	0,3 ± 0,02a	2,68 ± 0,35b
Extracto etéreo (g/100g)	0,27 ± 0,04a	1,25 ± 0,16b
Proteína (g/100g)	1,73 ± 0,04a	1,2 ± 0,13b
Fibra cruda (g/100g)	0,04 ± 0,004a	0,07 ± 0,007b

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

El contenido de cenizas fue mayor en el clon 2007 – 006 en comparación con el del clon 2008 – 001. Según Caicedo et al. (2003), un almidón de calidad generalmente se caracteriza por mantener su contenido de cenizas en un rango óptimo que varía entre el 0,17 % y el 0,4 %. En este contexto, el almidón obtenido del clon 2008 – 001 se sitúa dentro de este rango deseado y, dentro del rango de 0,25 – 0,33 % reportado por Thitipraphunkul et al., (2003a); al mismo este valor es comparable con el valor reportado por Watcharatewinkul et al. (2009) de 0,34 % y con el valor reportado por Perez & Lares (2005) de 0,32 %. Por otro lado, el clon 2007 – 006 reportó valores muy altos comparados con los mencionados. El elevado contenido de cenizas en el clon 2007 – 006 (Figura 4-1 (b)) se atribuye al contenido de minerales presente en la muestra (Alvis et al., 2008), el cual se identificó como silicio (Si) como fue corroborado en análisis posterior de minerales.

En relación con el contenido de lípidos (extracto etéreo), el clon 2008 – 001 se encuentra dentro del rango permisible por la Norma Técnica Colombiana (NTC 3228), que establece un valor máximo del 0,5 %. En cambio, el clon 2007 – 006 mostró un valor superior a esta recomendación. Este valor se sitúa en un rango que se asemeja al reportado para el almidón de maíz con altos contenidos de amilosa (1,04 %) (Obadi et al., 2023) y al del almidón de avena, que se caracteriza por tener elevados contenidos de lípidos (1,85 %) (Kaur et al., 2022). El valor de 1,25 % es muy superior al reportado en China, para almidón de achira de 0,52 % (Zhang et al., 2021), o a los reportados en Colombia los cuales oscilan entre 0,002 – 0,005 % (Yaruro et al., 2021), o en Tailandia, entre 0,014 – 0,019 % (Thitipraphunkul et al., 2003a). De acuerdo con Peroni et al. (2006), un bajo contenido de

---

lípidos (inferior al 1%) no influye en las propiedades funcionales del almidón, pero es difícil de confirmar pues se necesitaría tener dos almidones que solo difieran en el contenido de lípidos. Es importante desatacar que un contenido elevado de lípidos es útil para la industria de papel y la pulpa de celulosa (Kaur et al., 2022).

Con respecto al contenido de proteínas, la Norma Técnica Colombiana indica un contenido máximo de 1 %, el cual no es cumplido por los clones evaluados. El clon 2008 – 001 muestra un valor superior en comparación con el clon 2007 – 006. El valor de 1,73 % es el mayor dato para el contenido de proteína reportado en la literatura, superando a las variedades informadas por Perez & Lares (2005), quienes reportaron un valor de 0,67 % para una variedad en Venezuela. En contraste, se encuentran los valores más bajos en algunas variedades tailandesas, que oscilan entre 0,069 – 0,078 % según lo informado por Thitipraphunkul et al. (2003a). Para otras variedades colombianas, se han registrado valores que van desde 0,24 hasta 0,49 % (Yaruro et al., 2021). Además, las medias estadísticas de los almidones analizados presentan diferencias significativas entre ellas. Estas diferencias pueden atribuirse al origen botánico, la madurez de las raíces en la cosecha y las condiciones de extracción (Perez & Lares, 2005). Un contenido elevado de proteínas puede ser útil en la elaboración de harinas compuestas, como alternativa nutricional de alimentos ricos en proteínas (García et al., 2020); sin embargo, un exceso de proteínas puede afectar las propiedades térmicas, de viscosidad y la estabilidad del almidón (Pardo et al., 2013).

En cuanto al contenido de fibra cruda, los almidones estudiados presentaron valores muy bajos en este parámetro. En la mayoría de los estudios, no se detectó contenido de fibra, la cual puede interferir con las propiedades fisicoquímicas del almidón (Kayode et al., 2021). Se han reportado valores más elevados de contenidos de fibra por Piyachomkwan et al. (2002), que oscilan entre 0,4 y 0,9 %. Por otra parte Perez & Lares (2005) reportaron un valor de 0,34 %. Al igual que en las propiedades anteriores, se observaron diferencias significativas en estos resultados, lo cual puede indicar que entre los dos clones de almidón señalan no son idénticos en términos de composición. A partir de lo anterior, se puede concluir que el rango de fibra cruda hallado para los dos clones de achira no coincide con la información relacionada para la especie *Canna edulis*. Esta discrepancia podría sugerir variaciones en la composición de almidón entre los clones analizados



### 4.2.2 Contenido mineral

Los resultados del contenido mineral en los almidones estudiados y algunos valores citados en la literatura para el almidón de achira se encuentran en la Tabla 4-2. En primer lugar, se presenta el contenido de nitrógeno, para el cual el clon 2008 – 001 presenta un valor más alto en comparación con el clon 2007 – 006, lo cual es consistente con el contenido de proteína determinado para ambos clones (ver Tabla 4-1). Para el almidón de la especie *Canna edulis*, Hoover (2001) reporta un contenido de 100 ppm, el cual es inferior en comparación con los almidones evaluados. En relación con el almidón de yuca, uno de los requisitos fisicoquímicos es que este contenido no supere el valor de 640 ppm (Aristizábal & Sánchez, 2007), requisito que cumple el clon 2007 – 006. Por otra parte Hoover (2001) indica para el almidón de yuca (*Manihot esculenta*) un rango entre 90 y 131 ppm, mientras que para la papa (*Solanum tuberosum*) y la batata (*Ipomea babatas*) un contenido de 1 000 ppm y 60 ppm respectivamente. A partir de esto, se puede evidenciar que el valor reportado para el clon 2008 – 001 (990 ppm) es cercano al reportado para el almidón de papa, mientras que el clon 2007 – 006 presenta un valor superior al rango reportado para el almidón de yuca. Es importante resaltar que para el consumo humano es recomendable niveles bajos de nitrógeno, lo que resalta la relevancia de estos hallazgos (Aristizábal & Sánchez, 2007).

En cuanto al contenido de fósforo, los almidones evaluados no presentaron diferencias estadísticamente significativas en la media, según lo determinado, ni diferencias significativas entre ellos. Según Mendez et al. (2022), el almidón de achira tiene un elevado contenido de fósforo e indica un valor de 480 ppm, lo cual concuerda con el valor de 460 ppm reportado para los dos almidones estudiados. Por otra parte, Thitipraphunkul et al. (2003a) reportan un rango inferior para este mismo almidón, entre 362 y 399 ppm, en tres especies de achira cultivadas en Tailandia. A su vez, Fuentes et al. (2019) reportan un valor de 433 ppm para esta especie cultivada en Bolivia, cercano al encontrado en la presente investigación. De otra parte, Lares & Pérez (2006) reportan 779,1 ppm, un valor notablemente superior para una especie cultivada en Venezuela. Estas diferencias se pueden atribuir a factores medioambientales, la genética de la planta o el procesamiento y la extracción (Hoover, 2001; Lares & Pérez, 2006). Se debe agregar que este mineral es de alta importancia en los almidones ya que influye en las propiedades funcionales del mismo (Fuentes et al., 2019; Guízar Miranda et al., 2008; Mendez et al., 2022).

**Tabla 4-2:** Contenido de minerales del almidón de dos clones de achira y su comparación frente a algunos minerales reportados en literatura.

Mineral	Unidad	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006	Lares & Pérez (2006)	Thitipraphunkul et al. (2003a)
Nitrógeno (N)	ppm	990a	280b	NR	NR
Fósforo (P)	ppm	460a	460a	779,1	362 – 399
Potasio (K)	ppm	190a	150a	272	35 – 61
Calcio (Ca)	ppm	180a	300b	24	113 – 154
Magnesio (Mg)	ppm	150a	120a	203,7	17 – 27
Sodio (Na)	ppm	40a	40a	442,9	27 – 40
Azufre (S)	%	<0,006	<0,006	NR	NR
Hierro (Fe)	ppm	24,396a	327,115b	47,9	19 – 50
Cobre (Cu)	ppm	<1,56	<1,56	NR	NR
Manganeso (Mn)	ppm	<6,25	<6,25	NR	NR
Zinc (Zn)	ppm	3,637a	2,151b	22,1	NR
Boro (B)	ppm	<1,56	<1,56	NR	NR

**Nota.** NR: No Reporta. a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

Con respecto al contenido de potasio y calcio, los almidones de los clones evaluados presentaron cantidades mayores en comparación con el magnesio, el sodio y el zinc. Estos elementos presentan una gran influencia en las propiedades de pastificación, como se informa en la literatura (Thitipraphunkul et al., 2003a). En el caso particular del potasio, el clon 2008 – 001 mostró un contenido superior, mas no significativo, en comparación del clon 2007 – 006, y aunque en los dos casos se encuentran entre los valores reportados en la literatura, los contenidos reportados de este mineral por diferentes fuentes son muy amplios, como se observa en la Tabla 4-2. Para el maíz, la papa y el arrurruz se reportan valores de 943,43, 96,71 y 4 312,95 respectivamente (Lan et al., 2023; Malki et al., 2023).

El contenido de calcio, por otra parte, reportó diferencias significativas entre los dos clones, siendo mayor para el clon 2007 – 006. No obstante, el contenido de los dos es superior al reportado para la achira por Thitipraphunkul et al. (2003a) y muy superior al reportado por Lares & Pérez (2006). Con respecto a otros almidones, el contenido de Ca encontrado en el clon 2008 – 001 fue similar al reportado para el almidón de maíz (176,53 ppm) (Lan et

al., 2023); mientras que en el clon 2007 – 006 es más cercano al encontrado para el almidón de arrurruz (382,67 ppm) por Malki et al. (2023). Desde el ámbito nutricional, esta es una importante característica, aunque pueden afectar las propiedades funcionales del mismo (Cui et al., 2022; Garnica et al., 2010; Malki et al., 2023).

El contenido de magnesio y sodio no presentaron diferencias significativas entre los clones evaluados y sus contenidos son inferiores a los reportados por Lares & Pérez (2006), quienes reportan un valor diez veces superior para el sodio y de cerca del 50 % mayor para magnesio. Frente a otras fuentes de almidón, se encontró que el almidón de maíz y papa presentan valores superiores 506,76 y 326,77 ppm (Lan et al., 2023); a los encontrados en estos dos clones de achira estudiados, mientras que el almidón de arrurruz presentó un contenido similar con un valor de 52,60 ppm (Malki et al., 2023). Sin embargo, con respecto a lo reportado por Thitipraphunkul et al. (2003a), el sodio se encontró en cantidades similares, mientras que la presencia de magnesio en los clones evaluados fue superior a lo reportado por este autor. El contenido de magnesio fue superior para ambos clones en comparación con el almidón de papa (110,6 ppm) y maíz (90,43 ppm) reportados por Przetaczek et al. (2019) y Lan et al. (2023) respectivamente. En la misma línea, el contenido de zinc presentó diferencias significativas, siendo ligeramente superior en el clon 2008 – 001. No obstante, ambos almidones evaluados presentaron un contenido inferior en comparación con Lares & Pérez (2006) (22,1 ppm). Es importante destacar que los resultados obtenidos se asemejan al valor reportado para el arrurruz, de 2,59 ppm (Malki et al., 2023) y son inferiores a los presentados para el almidón de papa y el de maíz (Lan et al., 2023) de 10,54 y 8,47 ppm.

En relación con el contenido de hierro determinado en los dos clones de achira, se encontró una diferencia significativa entre ellos, ya que el almidón del clon 2007 – 006 presenta una cantidad diez veces mayor que el clon 2008 – 001. En comparación con los datos literarios, el valor reportado para el clon 2008 – 001 se encuentra dentro del rango mencionado por Thitipraphunkul et al. (2003a) de 19 a 50 ppm, y por debajo del valor encontrado por Lares & Pérez (2006), que fue de 47,9 ppm. Con respecto a otras fuentes de almidón, Malki et al. (2023) informa de un contenido aún menor, de 9,07 ppm para el almidón de arrurruz.

Por último, los niveles de azufre, cobre, manganeso y boro presentaron concentraciones tan bajas que no pudieron ser determinadas mediante los métodos analíticos empleados.

La ausencia de trazas de estos metales pesados proporciona un indicador de la pureza y calidad de los almidones sometidos al análisis (Caicedo et al., 2003; Pedrosa et al., 2018).

Las diferencias encontradas en el contenido de minerales pueden atribuirse a la variabilidad en la presencia de hierro en el suelo, ya que los dos clones fueron cultivados en los mismos lugares y los procesos de extracción se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones de operación. Los niveles elevados de hierro y calcio podrían ser beneficiosos para la aplicación de este almidón en la industria alimentaria (Malki et al., 2023; Vilpoux & Santos, 2023; Zhang, Wang, & Shi, 2010). A pesar de la importancia del contenido de minerales, se han realizado pocos estudios sobre la composición mineral en almidones (Perez & Lares, 2005).

### 4.2.3 Acidez titulable y pH

Los valores encontrados para la acidez titulable y el valor del pH en el almidón de achira se encuentran reportados en la Tabla 4-3. Para la acidez titulable, se reportan valores para el almidón de achira de 0,0042 % (Leonel et al., 2002) y 0.01% – 0.02% (Yaruro, 2018), valores entre los cuales se encuentran los clones analizados. Pese a esto, frente a las recomendaciones establecidas para otros almidones como el de yuca, para el cual se recomiendan valores entre 0,002 y 0,005 %, el almidón de achira proveniente de los dos clones presentó valores muy altos. De acuerdo con los resultados encontrados, el almidón del clon 2008 – 001 presentó mayor porcentaje de acidez que el clon 2007 – 006, pero estas diferencias no fueron significativas.

**Tabla 4-3:** Valores de determinación del pH y el porcentaje de acidez en el almidón de achira.

Almidón de achira	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006
pH	6,23 ± 0,06a	6,07 ± 0,015a
% Acidez	0,0074 ± 0,0002a	0,0063 ± 0,0005a

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

Según Radley (1976) el valor del pH para los almidones se encuentra entre 5 y 7, intervalo en el que se encuentran las muestras analizadas. No obstante, los valores de pH encontrados están por encima de lo recomendado en la norma NTC 3228 de 5,5 y 6,0 para

el almidón de achira, pero dentro del rango que reporta Caicedo et al. (2003), el cual deben cumplir los almidones de achira para ser de calidad, entre 5,5 a 6,2. El clon 2007 – 006 presentó valor de pH más ácido en comparación con el clon 2008 – 001 y en general, los dos presentaron valores inferiores a los reportados para cuatro variedades por Yaruro et al. (2021), con valores entre 6,53 – 6,77.

#### 4.2.4 Actividad de agua

Los valores promedios de la actividad de agua determinados para las muestras del almidón de los dos clones de achira se encuentran en la Tabla 4-4. La actividad de agua desempeña un papel fundamental en la vida útil de un producto, junto con la temperatura y la humedad relativa de almacenamiento, y se recomienda un igual o inferior a 0,4 (Aristizábal & Sánchez, 2007; Ramírez et al., 2014). Según Rockland & Beuchat (1987), se recomienda un rango entre 0,2 a 0,4 para la estabilidad de la mayoría de alimentos deshidratados, valores inferiores a los alcanzados por el almidón de los dos clones analizados. Asimismo, Rahman (2007) indica que el rango de actividad de agua donde se favorece el crecimiento microbiano se encuentra entre 0,6 y 0,9; esto conlleva a pensar que los dos clones están cerca al límite para que se favorezca el crecimiento microbiano, aunque el clon 2007 – 006, presenta menor  $A_w$ , la diferencia no es significativa. Con respecto a otras fuentes de almidón, para el de yuca se reportan valores de 0,43 (Sanguino & Salazar, 2013), mientras que para la harina de trigo de 0,65 (Montoya & Giraldo, 2010), lo cual podría conducir a postular que el almidón de yuca es más estable desde el punto microbiológico que el de achira, pero este último es más estable que el de trigo. Este parámetro es importante para estimar la vida en anaquel, pues a menor valor mayor vida útil.

**Tabla 4-4:** Actividad de agua para el almidón de dos clones de achira.

Almidón	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006
$A_w$	0,603 ± 0,023a	0,571 ± 0,008a

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

### 4.2.5 Densidad real

Los resultados presentados en este análisis se detallan en la Tabla 4-5, donde se observa que se presentaron diferencias significativas en este parámetro entre los dos clones, es decir cuando se realizó el análisis estadístico mencionado en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se obtuvo un p por debajo de 0,05. Lo cual indica que las diferencias en la densidad entre los dos clones fueron lo suficientemente marcadas como para ser poco probables bajo la hipótesis nula de que no hay diferencia real. El clon 2007 – 006 presenta una mayor densidad que el clon 2008 – 001. Según Caicedo et al. (2003) uno de los parámetro de calidad del almidón de achira es la densidad, la cual se debe encontrar entre 0,63 y 0,71 g/cm<sup>3</sup>, valores inferiores a los obtenidos para los clones de achira. Sin embargo, es relevante señalar que los valores presentados en este estudio corresponden a la densidad real del almidón. La literatura revisada solo reporta densidad aparente del almidón de achira, y no se encontraron datos específicos para la densidad real. Por otra lado, Ospitia (2019) reporta un valor de la densidad aparente de 0,69 g/cm<sup>3</sup> para el almidón de achira, el cual es menor que los valores hallados en el presente estudio.

**Tabla 4-5:** Densidad real determinada para los almidones de achira evaluados.

Almidón de achira	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006
Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )	1,377 ± 0,0005a	1,407 ± 0,0001b

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

En el caso del almidón de arracacha se reporta un valor de 1,38 g/cm<sup>3</sup> para la densidad verdadera de este almidón (Rodríguez et al., 2005), similar al valor reportado para el clon 2008 – 001, mientras que el almidón de papa reportan un rango entre 1,12 y 1,40 g/cm<sup>3</sup> (Digaitis et al., 2022), el cual fue evaluado por el mismo método empleado en el presente estudio. Estas diferencias asociadas al origen del almidón se relacionan con el tamaño de gránulo presentado y la estructura molecular del mismo. Es importante destacar que las muestras de almidón presentaron diferencias significativas en las medias estadísticas analizadas. Finalmente, almidones de alta densidad son empleados para el control de la humedad en productos deshidratados de uso farmacéutico (Vilpoux et al., 2019). Por lo anterior, se puede inferir que los almidones de achira podrían ser utilizados con este fin en la industria farmacéutica u otra en que mantener la humedad en bajos valores sea clave.

### 4.2.6 Contenido de almidón total

Los resultados relacionados con el contenido de almidón total se presentan en la Tabla 4-6. Este parámetro se relaciona directamente con la pureza del almidón. Valores de almidón total entre 75 % a 89 % (Aprianita et al., 2014), señalan almidones con un grado de pureza aceptable. Desde este punto de vista, los almidones aquí analizados cumplen con esa condición. Algunos valores reportados en la literatura para el almidón de achira en cuatro variedades colombianas estudiadas se encuentran entre 73,50 y 85,56 % (Rodríguez, 2003; Yaruro et al., 2021).

Además, los almidones estudiados muestran un contenido inferior al reportado para especies extranjeras, como en el caso de Leonel et al. (2002) en Brasil con un valor de 88,53 % y Aprianita et al. (2014) en India con un valor de 88,10 %. Es importante destacar que fuentes de almidón con altos contenidos de este polímero, es una necesidad para reemplazar al almidón de maíz, principal almidón utilizado en la industria (Enesi et al., 2022).

**Tabla 4-6:** Contenido de almidón presente en las muestras evaluadas de achira.

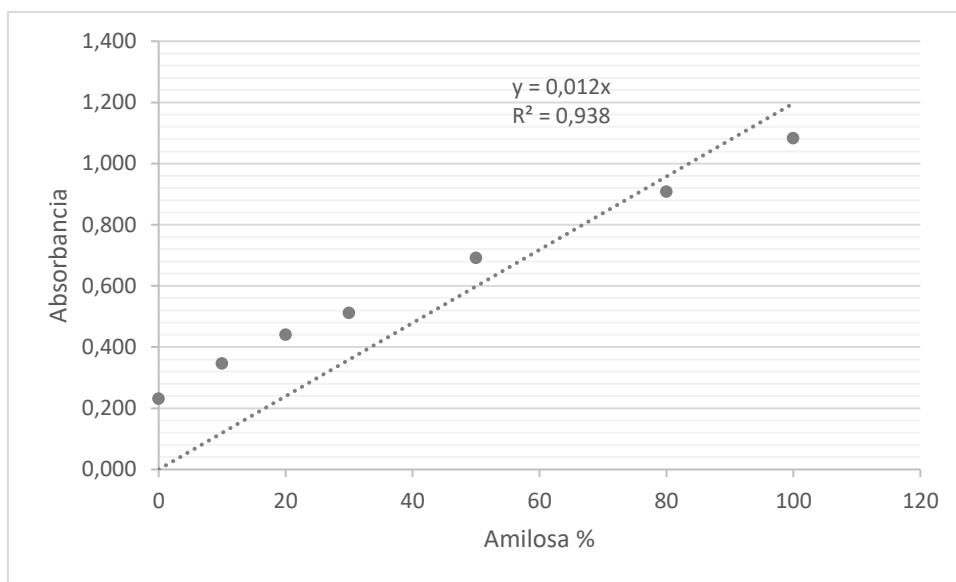
Almidón	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006
Contenido (%)	79,14 ± 2,41a	78,58 ± 1,25a

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

### 4.2.7 Contenido de amilosa y amilopectina

En la Figura 4-2 se presentan gráficamente los datos del contenido de amilosa y su relación con la absorbancia, junto con la curva de calibración obtenida a partir de los patrones de amilosa y amilopectina, como se describe en el capítulo anterior. Además, se presenta la ecuación utilizada para calcular el contenido de amilosa y el valor de  $R^2$  que representa el grado de ajuste de la gráfica. Es importante destacar que, en la construcción de la curva de calibración para el contenido de amilosa, se empleó un ajuste matemático que obligó a la curva a pasar por cero, sin necesidad de realizar la sustracción del blanco. Esta decisión se tomó considerando que el instrumento utilizado restaba automáticamente el blanco durante las mediciones. Por tanto, este ajuste garantizó una coherencia en el proceso analítico, evitando la duplicación de la operación de restar el blanco. Los resultados obtenidos para el contenido de amilosa y amilopectina se presentan en la Tabla 4-7. Los

valores determinados tanto para el contenido de amilosa, como para el contenido de amilopectina de los almidones en este estudio no mostraron diferencias significativas entre ellos.



**Figura 4-2:** Curva estándar del contenido de amilosa con ajuste lineal.

Además, los valores del contenido de amilosa se encuentran en el rango descrito por Rodríguez (2003) (20 % y 39 %) para el contenido de amilosa del almidón de achira. Asimismo, los valores hallados son similares a los reportados por Yaruro et al. (2021) para el ecotipo colombiano “Negra” con un valor de 31,71 %. También, se asemejan al valor reportado por Cisneros et al. (2009) para la variedad “Sandía” en Perú, con un valor del 33,1 %, al igual que al valor de 33,32 % reportado por Leonel et al. (2002) para una variedad cultivada en Brasil. Por otra parte, los valores reportados para los dos clones de achira son superiores a las variedades Japanese-green, Thai-green y Thai-purple de Tailandia con 25, 22 y 19 % respectivamente (Thitiphunkul et al., 2003b), al igual que el valor reportado por Salazar et al. (2021) de 15,20 % para Ecuador.

**Tabla 4-7:** Contenido de amilosa y amilopectina del almidón de achira de dos clones.

Almidón de achira	Clon 2008 – 001	Con 2007 – 006
Amilosa (%)	32,68 ± 0,38a	32,33 ± 0,06a
Amilopectina (%)	67,32 ± 0,38a	67,67 ± 0,06a

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.



Adicionalmente, se han reportado contenidos superiores de amilosa para la especie *Canna edulis* de 35 % (Aprianita et al., 2014), 37,1 % (Van & Morita, 2005), 38,64 % (Purwitasari et al., 2023) y 39,4 % (Cisneros et al., 2009). En todos los casos, el contenido de amilosa es alto (Obadi et al., 2023); y esto es importante porque altos contenidos de amilosa han sido relacionados con la capacidad de formar geles más resistentes, debido a que la estructura de la amilosa es más ordenada en comparación con la amilopectina (Salazar et al., 2021); tienen una mayor capacidad de absorción de agua y presentan mayor viscosidad. De igual manera, este aspecto es deseable en la industria alimentaria, farmacéutica y papelera, así como en la fabricación de películas (Bertolini, 2010; Satin, 1998).

En relación con el contenido de amilopectina, para ambos clones se presentó un valor inferior en relación con el rango reportado por Yaruro et al. (2021), que varía entre 68,29 y 78,76 %. Por otro lado, el valor reportado por Aprianita et al. (2014) es inferior a los valores del presente estudio (60,27 %), mientras que Salazar et al. (2021) reporta un valor superior de 70,87 %, indicando que los clones estudiados se encuentran en estos rangos. Almidones con altos contenidos de amilopectina se han encontrado en productos de panadería y en jaleas (Yaruro et al., 2021), y también se han relacionado con mayor viscosidad (Thitipraphunkul et al., 2003b).

#### 4.2.8 Color

Los valores obtenidos para los parámetros de índice de blancura (IB), luminosidad  $L^*$ , y delta  $a^*$  y  $b^*$  se encuentran en la Tabla 4-8: Índice de blancura y delta  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  para el almidón de dos clones de achira. De acuerdo con los estándares de calidad para el almidón de achira, Caicedo et al. (2003) señalan que el análisis en un colorímetro debe ser similar al blanco (IB = 100) (Montoya & Giraldo, 2010). En este estudio, los almidones se acercan al blanco ideal, con valores de 92,09 y 92,17. Es importante destacar que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el índice de blancura entre ambos clones. Algunos autores, como Piyachomkwan et al. (2002), informan un rango entre 89,9 a 91,5 % para el almidón de cuatro variedades de achira cultivadas en Tailandia. Por otro lado, Yaruro et al. (2021) reportan un rango entre 88,97 – 90,31 % para cuatro ecotipos colombianos. Wu et al. (2020) indican un valor de 91,76 % para una variedad cultivada en China, mientras que Purwitasari et al. (2023) encontraron un valor de 84,49 % para una variedad cultivada en Indonesia. Según lo anterior, el índice de blancura

obtenido para los almidones de este estudio es el ligeramente superior en comparación con la literatura citada.

Con respecto a la luminosidad ( $L^*$ ) de las muestras, el clon 2008 – 001 presentó un valor superior en comparación con el clon 2007 – 006, y entre ellos, presentan diferencias estadísticamente significativas. En relación con los valores reportados en la literatura, Wu et al. (2020) indica un valor de 95,20, Purwitasari et al. (2023) presenta un valor de 88,13 y Yaruro et al. (2021) reporta un rango entre 90,50 y 91,99. Teniendo en cuenta los valores reportados en la literatura, los clones presentaron un valor inferior en comparación con estos autores. El parámetro  $L^*$  es el que mejor representa la blancura del almidón, ya que presenta un aporte significativo en el índice de blancura en comparación con los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  (Piyachomkwan et al., 2002; Zamudio et al., 2010).

**Tabla 4-8:** Índice de blancura y delta  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  para el almidón de dos clones de achira

Almidón de achira	Parámetro			
	IB (%)	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Clon 2008 – 001	92,09 ± 0,10a	86,53 ± 0,74a	0,22 ± 0,03a	5,97 ± 0,19a
Clon 2007 – 006	92,17 ± 0,06a	83,74 ± 0,46b	-0,001 ± 0,02b	5,36 ± 0,07a

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

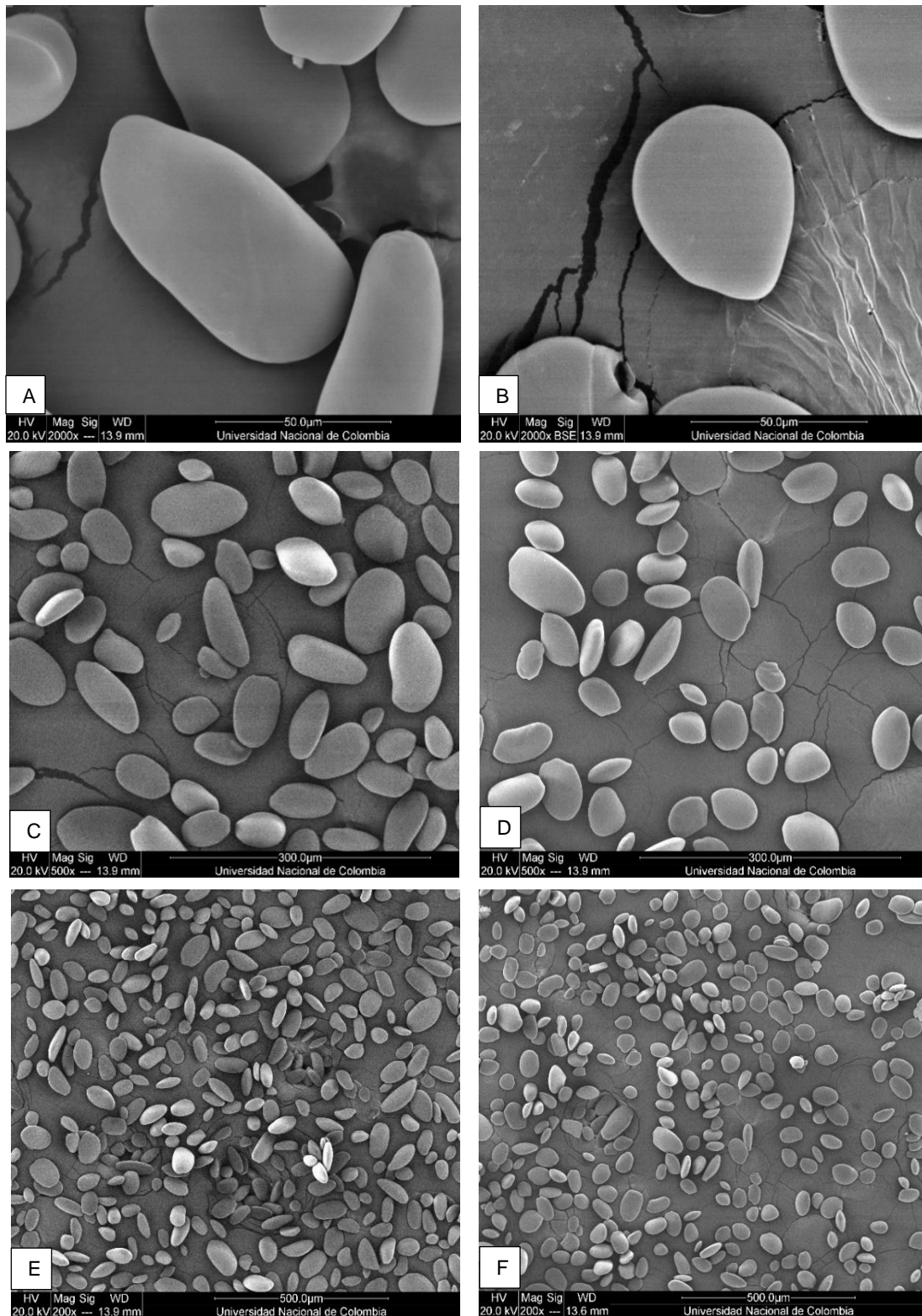
En relación con el parámetro  $a^*$ , se determinó que existen diferencias significativas entre las medias analizadas, donde el clon 2007 – 006 refleja un valor bajo hacia la tonalidad verde, característico de algunos productos farináceos (Montoya & Giraldo, 2010). Adicionalmente, Purwitasari et al. (2023) indica una mayor tendencia al color verde con un valor inferior de -4,81 para una variedad indonesia. Por otra parte, el clon 2008 – 001 se encuentra en el intervalo de 0,16 a 2,17 para algunas variedades colombianas (Yaruro et al., 2021) y es inferior al valor de 1,67 determinado en una variedad china (Wu et al., 2020). En cuanto al parámetro  $b^*$ , los clones analizados no presentaron diferencias estadísticas significativas y los resultados obtenidos sugieren una ligera tonalidad amarilla de las muestras (Acuña, 2012). Cabe agregar que los valores de  $b^*$  para los clones estudiados se encuentran en el rango reportado por Yaruro et al. (2021), el cual se encuentra entre 5,15 y 6,05. Valores superiores son reportados por Wu et al. (2020) y Purwitasari et al. (2023) de 6,46 y 8,22, respectivamente.

Las diferencias encontradas entre las muestras estudiadas y la información reportada en la literatura se asocian a la fuente de extracción del almidón y el tamaño de partícula, donde menores tamaños impiden la lixiviación de los componentes de productores de color (Yaruro et al., 2021). Por otra parte, este aspecto es relevante para aplicaciones tanto alimentarias como no alimentarias, ya que influye en la apariencia y calidad de los productos finales donde se utilicen (García Acosta et al., 2013; Kayode et al., 2021; Zamudio et al., 2010). Particularmente, influye en su uso en la industria papelera y textil, para dar claridad al producto final (Radley, 1976).

## **4.3 Características morfológicas**

### **4.3.1 Morfología del gránulo**

En la Figura 4-3 se observan los gránulos de almidón de achira a ampliaciones de 2000x, 500x y 200x respectivamente. En la mayor ampliación de estas (Figura 4-3 a y b), se evidencia la diferencia de los gránulos entre un almidón y el otro, donde el clon 2008 – 001 presenta una forma ovalada y altamente alargada en comparación con la forma redonda y esférica de la mayoría de los gránulos del clon 2007 – 006. Ambos almidones presentan una textura lisa, con superficies sin poros, lo que indica que se realizó una extracción limpia del almidón y que no hubo daño en el proceso (Watcharatewinkul et al., 2009; Yaruro et al., 2021). La forma y textura encontradas para el almidón de los clones de achira coinciden con la forma ovalada, elipsoidal, redonda o en forma de disco de los gránulos de almidón de achira para variedades estudiadas en Colombia (Ávila, 2018; Ospitia, 2019; Yaruro et al., 2021), en Bolivia (Fuentes et al., 2019), Brasil (Leonel et al., 2002; Peroni et al., 2006) y Tailandia (Piyachomkwan et al., 2002; Thitipraphunkul et al., 2003a; Watcharatewinkul et al., 2009). Las formas más redondeadas son útiles en la retención de humedad, alimentos viscosos y texturas más suaves (Malki et al., 2023; Peroni et al., 2006).

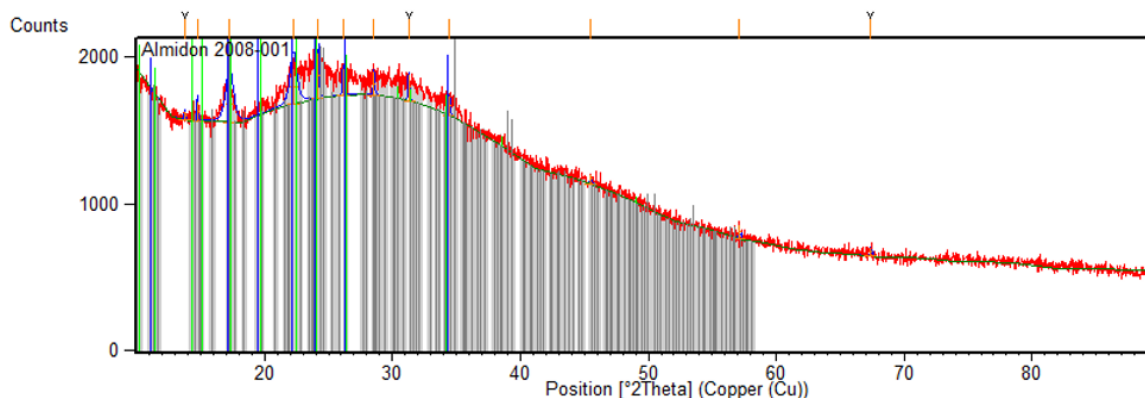


**Figura 4-3:** Fotografía SEM para el almidón de achira: Clon 2008 – 001 a (2000x), c (500x), e (200x) y Clon 2007 – 006 b (2000x), d (500x), f (200x)

En relación con la morfología reportada para el almidón de otras fuentes, el almidón de maíz presenta forma redonda y de poliedro irregular (Aristizábal & Sánchez, 2007; Medina & Salas, 2008; Prieto, 2007). En el caso del almidón de papa, se observa una mayor diversidad en su forma según el origen botánico; sin embargo, algunos autores coinciden en que los granos de mayor tamaño tienden a ser elípticos, mientras que los más pequeños suelen ser esféricos, todos ellos con superficies suaves y uniformes (Alvis et al., 2008; Aristizábal & Sánchez, 2007; Medina & Salas, 2008). En cuanto al almidón de yuca, se han reportado formas ovaladas, esféricas y truncada (Alvis et al., 2008; Aristizábal & Sánchez, 2007; Medina & Salas, 2008; Peroni et al., 2006). A partir de lo anterior, los almidones de este estudio presentan similitud con estos almidones en su forma ovalada y redondeada; sin embargo, solo coinciden con la textura lisa que reportada para el almidón de papa.

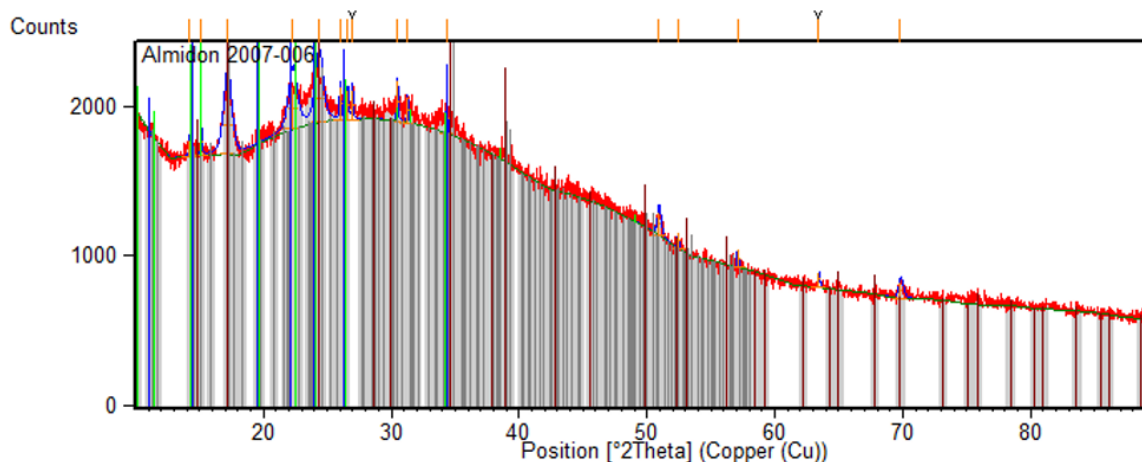
### **4.3.2 Análisis de la estructura cristalina**

Los patrones de difracción de rayos X para el clon 2008 – 001 y el clon 2007 – 006 se representan en las Figura 4-4 y Figura 4-5 respectivamente. En ambos casos, los difractogramas muestran un patrón cristalino de tipo B, característico de los almidones de tubérculos, algunas raíces y almidones con altos contenidos de amilosa (Obadi et al., 2023; Tester et al., 2004). En cuanto al porcentaje de cristalinidad de los almidones, se obtuvo un valor de 31,51 % para el clon 2008 – 001, que es un valor promedio, y un valor de 21,71 % para el clon 2007 – 006, que indica una baja cristalinidad (Obadi et al., 2023). Este último valor, es el menor reportado en la literatura para el almidón de achira, en comparación con el 25,45 % reportado por Zhang, Wang, & Yang (2010) en un estudio realizado en China, y el 36,6 % reportado por Mendez et al. (2022) en un estudio realizado en México. Mientras que el clon 2008 – 001 se encuentra en el rango comúnmente reportado para el almidón de achira (25 – 35 %) descrito en el primer capítulo.



**Figura 4-4:** Perfil de difracción del almidón de achira, clon 2008 – 001.

En comparación con los almidones de cereales, estos se consideran con alto grado de cristalinidad, debido a que comúnmente presentan un patrón cristalino tipo A (Kaur et al., 2022; Obadi et al., 2023). En caso del maíz, se reportan rangos entre el 17 – 42 % (Tester et al., 2004) para contenidos de amilosa de 84 % y 0%, respectivamente. De acuerdo con lo anterior, se observa una correlación negativa entre el porcentaje de cristalinidad y el contenido de amilosa (Obadi et al., 2023). En el caso de la avena, se indican rangos entre el 28 y el 37 % (Kaur et al., 2022), rango en el que se encuentra el clon 2008 – 001. Por otro lado, la papa reporta un valor de 27,5 % (Wang et al., 2023), inferior al determinado para el clon 2008 – 001 y mayor al valor hallado para el clon 2007 – 006.



**Figura 4-5:** Perfil de difracción del almidón de achira, clon 2007 – 006.

El mayor pico de difracción más destacado del clon 2008 – 001 es en la posición 24 ° del ángulo 2θ (Figura 4-4) y un doblete en 17 ° y 22 °. Por otro lado, el clon 2007 – 006 muestra

un pico principal en la posición de  $17^\circ$  de  $2\theta$  (Figura 4-5) y un doblete a  $22^\circ$  y  $24^\circ$ . Al igual que en el estudio de Zhang, Wang, & Yang (2010), los clones evaluados no presentaron un pico en  $5,6^\circ$ , como se informa en otros estudios (Chuenkamol et al., 2007; Fuentes et al., 2019; Thitiphunkul et al., 2003a); sin embargo, los picos principales sí coinciden con los resultados obtenidos por otros autores en  $17^\circ$ ,  $22^\circ$  y  $24^\circ$ . Además, los picos de difracción encontrados para el clon 2007 – 006 concuerda con los ángulos determinado por Mendez et al. (2022) con un doblete en  $22^\circ$  y  $24^\circ$  y otros autores (Chuenkamol et al., 2007; Fuentes et al., 2019; Thitiphunkul et al., 2003a).

Aunque los almidones estudiados presentan el mismo contenido de amilopectina, las diferencias observadas en el porcentaje de cristalinidad podrían estar relacionadas con las variaciones en la morfología de los gránulos y/o en la longitud de las cadenas de amilopectina (Fuentes et al., 2019; Mendez et al., 2022). Un menor porcentaje de cristalinidad implica una región amorfa más grande y una disminución en la fuerza de los enlaces internos de las moléculas, lo cual influye en la disminución de la textura, la estabilidad y aumenta la digestibilidad de los productos, propiedades principalmente deseables en algunos productos alimenticios y en la industria farmacéutica para la liberación de medicamentos (Leonel et al., 2021).

#### 4.4 Características térmicas

Los resultados de la transición térmica para los dos clones de almidón de achira se presentan en la Tabla 4-9, y la representación gráfica del proceso de gelatinización de los almidones se encuentra en las Figura 4-6 y Figura 4-7. El momento en que los gránulos de almidón comienzan a hincharse y romper su estructura, se identifica con el parámetro  $T_o$ . Mendez et al. (2022), proceso que se lleva a cabo a una temperatura superior a  $50^\circ\text{C}$ . Para el caso de los almidones estudiados, ambos reportan una temperatura superior a este umbral, aunque el clon 2008 – 001 reporta una temperatura más alta en comparación con el clon 2007 – 006. Los valores obtenidos para los almidones del presente estudio son comparables con algunos autores presentados en la Tabla 2-3 para las variedades estudiadas en China,  $59,71^\circ\text{C}$  (Zhang, Wang, & Yang, 2010), Venezuela,  $58,95^\circ\text{C}$  (Perez & Lares, 2005), Colombia  $59,2^\circ\text{C}$  (Mendez et al., 2022) y  $61,16$  a  $63,03^\circ\text{C}$  (Yaruro et al., 2021) y Bolivia de  $61,5^\circ\text{C}$  (Fuentes et al., 2019). Sin embargo, es importante destacar que para ambos clones, la  $T_o$  es inferior a la determinada para algunas variedades estudiadas

en Tailandia, que oscilan entre 65,8 °C y 69,2 °C (Chuenkamol et al., 2007; Thitipraphunkul et al., 2003a; Watcharatewinkul et al., 2009).

**Tabla 4-9:** Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para el almidón de dos clones de achira.

Almidón de achira	$T_o$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)
Clon 2008 - 001	63,43	66,96	70,75	20,85
Clon 2007 - 006	58,72	62,63	66,55	16,74

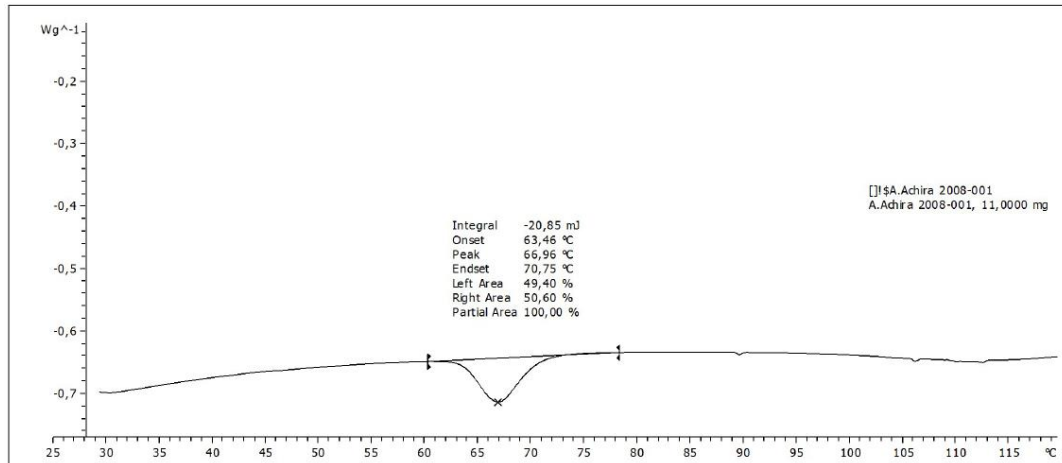
**Nota.**  $T_o$  : temperatura inicial,  $T_p$  : temperatura pico,  $T_f$  : temperatura final,  $\Delta H$  : Cambio de entalpia.

En lo que respecta a la temperatura pico o de gelatinización  $T_p$ , donde se produce la ruptura de las cadenas de amilosa y amilopectina, una elevada temperatura refleja una alta resistencia al proceso de gelatinización (Leonel et al., 2021). El almidón de achira estudiado en países como Vietnam muestra temperaturas de gelatinización elevadas, como 70,8 °C (Van & Morita, 2005), y en la India se informan valores de 69,8 °C (Aprianita et al., 2014). Estos valores son superiores al obtenido para el clon 2008 – 001, aunque son similares a los valores informados para variedades estudiadas en Venezuela, con una temperatura de 63,61 °C (Pérez & Lares, 2005), Bolivia con 65,6 °C (Fuentes et al., 2019) y Colombia con 65,2 °C (Mendez et al., 2022). La baja temperatura de gelatinización presentada por el clon 2007 – 006 puede ser útil para la industria de alimentos, para el procesamiento a bajas temperaturas, mientras que una elevada  $T_p$  presentada por el clon 2008 – 001 podría servir como estabilizante a temperaturas más elevadas, especialmente para productos horneados o incluso congelados (Hoseney, 1991; Leonel et al., 2021).

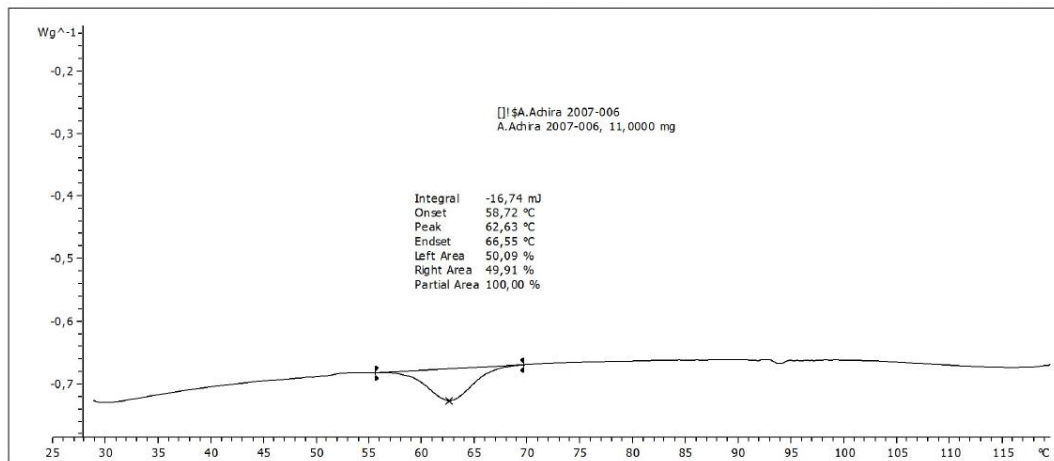
En cuanto a la temperatura final  $T_f$ , esta indica el reordenamiento de la nueva estructura del gel que presenta el almidón y el rango de temperaturas donde se presenta una gelatinización completa (Fuentes et al., 2019; Mendez et al., 2022). Para los almidones del presente estudio se obtuvo un  $\Delta T$  ( $T_f - T_o$ ) de 7,32 °C y 7,83 °C para el clon 2008 – 001 y el clon 2007 – 006, respectivamente. Otros autores reportan diferencias de alrededor de 4,9 °C para algunas variedades estudiadas en Tailandia (Chuenkamol et al., 2007; Thitipraphunkul et al., 2003a); mientras que en India y China se informan diferencias de aproximadamente 13,4 °C (Aprianita et al., 2014) y 12,15 °C (Zhang, Wang, & Yang, 2010), respectivamente. Valores cercanos a los encontrados en este estudio se presentan en Colombia, con un valor de 8,06 °C para la variedad nativa, y en Bolivia 8,5 °C para la



variedad púrpura (Fuentes et al., 2019; Yaruro et al., 2021). Las variaciones observadas entre las diversas variedades de almidón de achira se especulan que se deben a la homogeneidad de las moléculas de amilosa y amilopectina. Específicamente, las fracciones con intervalos más cortos de gelatinización podrían influir en las propiedades termo-mecánicas del almidón, afectando así las temperaturas de gelatinización entre las distintas variedades (Chuenkamol et al., 2007; Thitipraphunkul et al., 2003b).



**Figura 4-6:** Gráfica de la gelatinización del clon 2008 - 001.



**Figura 4-7:** Gráfica de la gelatinización del clon 2007 - 006.

En cuanto a la entalpía, Xie et al. (2023) indican que un alto valor de entalpía implica que el almidón tiene un alto grado de retrogradación. Esto se puede inferir para los clones estudiados, que presentan un valor elevado  $\Delta H$  en comparación con Chuenkamol et al. (2007), que indica un valor de 19,5 J/g, o Thitipraphunkul et al. (2003a), que informa un rango entre 17,6 y 18,4 J/g. El valor de la entalpía para ambos clones, supera el valor

reportado en Bolivia de 15,4 J/g (Fuentes et al., 2019), y el rango de 10,62 a 13,55 J/g por Yaruro et al. (2021) para cuatro ecotipos colombianos. Estos valores elevados en el cambio de entalpía son deseables en los productos en los que se necesita una estructura más sólida a lo largo del tiempo.

Estas diferencias entre las temperaturas de transición ( $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_f$ ) y las entalpías de gelatinización ( $\Delta H$ ), se atribuyen comúnmente al contenido de amilosa y amilopectina (Fuentes et al., 2019; Van Hung & Morita, 2005). Sin embargo, teniendo en cuenta que para los clones de este estudio se presenta el mismo contenido de amilosa, estas diferencias se sugieren que se atribuya a la morfología del grano, la estructura molecular de la región cristalina, la longitud de las cadenas de amilosa, entre otros (Thitipraphunkul et al., 2003b; Van Hung & Morita, 2005; Yaruro Cáceres et al., 2021). A partir de esto, se plantea la hipótesis que el grado de cristalinidad, puede influir en el cambio de entalpía, lo cual puede explicar los resultados encontrados para el clon 2008 – 001.

## 4.5 Características reológicas

### 4.5.1 Propiedades de la pasta

Los parámetros del perfil reológico determinado para los dos clones de achira se encuentran en la Tabla 4-10. El viscoamilógrafo de Brabender, al igual que la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), facilita la determinación de la temperatura de gelatinización, marcada por un aumento sustancial en la viscosidad. Aunque su precisión podría ser menor en comparación con algunos métodos, el viscoamilógrafo ofrece una perspectiva integral al proporcionar datos sobre la viscosidad y otras propiedades reológicas asociadas. La temperatura de gelatinización presentada por el almidón de achira del clon 2008 – 001, fue superior en comparación con el clon 2007 – 006. Lo cual también se reflejó en sus características térmicas. La temperatura de gelatinización de ambos clones es superior a un estudio realizado en Bolivia (61,9 °C) (Fuentes et al., 2019) y es inferior a los valores que reportan otros autores en Colombia, con un intervalo entre 68,37 – 70,95 °C (Yaruro et al., 2021), en Brasil, entre 69,9 – 71,2 °C (Leonel et al., 2002; Peroni et al., 2006) y en Tailandia, donde se reportan valores entre 70 y 73,7 °C (Chuenkamol et al., 2007; Saartrat et al., 2005; Thitipraphunkul et al., 2003a; Watcharatewinkul et al., 2009). Asimismo, la temperatura de gelatinización muestra una relación inversamente

proporcional con la viscosidad máxima de la suspensión (Watcharatewinkul et al., 2009). El clon 2007 – 006, que tiene una temperatura de gelatinización más baja, también presenta la viscosidad más alta de los dos almidones. Esta característica es beneficiosa en procesos donde se busca reducir los costos de fabricación de productos con almidones (Saartrat et al., 2005).

**Tabla 4-10:** Propiedades de la pasta obtenidos en el viscoamilógrafo de Brabender para el almidón de dos clones de achira.

Almidón de achira	T (°C)	PV (UB)	BD (UB)	SB (UB)
Clon 2008 – 001	67,6	343	195	89
Clon 2007 – 006	63,3	427	251	119

**Nota.** T: temperatura de gelatinización, PV: Peak Viscosity (viscosidad máxima), BD: Breakdown (Desgloce – Descomposición), SB: Seatback (Caída – Retroceso), UB: Unidades de Brabender.

El desgloce (BD) y retroceso (SB) de los almidones estudiados mostraron ser proporcionales al pico de viscosidad (PV) que presentaron. Esto significa que el almidón del clon 2007 – 006, que tuvo un PV más alto, también experimentó un BD y un SB más altos en comparación con el clon 2008 – 001. Este mismo comportamiento se observó para las variedades Thai-purple y Thai-green investigadas por (Saartrat et al., 2005) donde el PV fue de 154,13 RVU y 140,63 RVU respectivamente. En tanto que su BD y SB fue de 10,04 y 115,75 RVU para la variedad Thai-purple y, 7,17 y 103,67 RVU para la variedad Thai-green.

El BD de los almidones de este estudio fue aproximadamente el 58 % de la viscosidad máxima (PV). Este valor es inferior al 75 % reportado por Fuentes et al. (2019) y se sugiere que por diferencias en la distribución de tamaño de partícula, los gránulos más grandes contribuyeron al mayor pico de viscosidad. En contraste, según Van & Morita (2005), el BD es aún más bajo, alrededor del 3 % de PV, y Saartrat et al. (2005) informa una proporción de aproximadamente 6 % para el BD en relación con PV. Estos valores indican que son almidones con gran capacidad de resistir las fuerzas de corte y las altas temperaturas (Fuentes et al., 2019). Por lo anterior, en este estudio se deduce que los almidones carecen de resistencia a la gelatinización.

En contraste con lo que se ha descrito en la literatura, donde se informa de una alta retrogradación (Saartrat et al., 2005), los almidones en este estudio exhibieron un retroceso bajo, representando aproximadamente el 27 % de PV. Esto está en línea con

investigaciones anteriores similar a los estudios realizados por (Aprianita et al., 2014; Peroni et al., 2006; Thitipraphunkul et al., 2003a; Yaruro et al., 2021), donde la proporción de SB no supera el 30 % de PV. Lo anterior implica que los almidones de los clones de achira no forman geles fuertes cuando ocurre el enfriamiento. Esto puede ser útil en la fabricación de alimentos blandos, bebidas o productos contexturas suaves (Aprianita et al., 2014).

Si bien las diferencias entre los estudios anteriores se han atribuido principalmente al contenido de amilosa (Saartrat et al., 2005; Thitipraphunkul et al., 2003a; Van Hung & Morita, 2005), en este estudio, no se observaron diferencias significativas en el contenido de amilosa. Por lo tanto, estas diferencias podrían estar relacionadas con las fuerzas asociativas de los gránulos del almidón, la longitud de las cadenas de amilopectina o las diferencias en la cristalinidad (Aprianita et al., 2014; Chuenkamol et al., 2007; Leonel et al., 2002; Van Hung & Morita, 2005).

#### **4.5.2 Claridad del gel**

Los resultados de la transparencia de las soluciones de almidón para los dos clones de achira se reportan en la Tabla 4-11. Los almidones estudiados mostraron diferencias significativas, con el clon 2008 – 001 exhibiendo una mayor transmitancia que el clon 2007 – 006. Esta diferencia se debe principalmente a la presencia de partículas de color oscuro que presentó el clon 2007 – 006 (Figura 4-1). Según lo reportado en literatura, se consideran pastas claras aquellas con una transmitancia superior al 40 %, y ambos almidones cumplen con este criterio (Yaruro, 2018). En la literatura se han informado valores de transmitancia del 47 % para una variedad en Vietnam (Van & Morita, 2005), del 60 % en India (Aprianita et al., 2014), entre 79 % y 82 % en Tailandia (Thitipraphunkul et al., 2003a) y entre 43,09% y 58,59 % en Colombia (Yaruro et al., 2021). Por lo tanto, se puede inferir que los almidones del presente estudio presentan los valores más altos de transmitancia. En comparación con otras fuentes, se considera que las pastas de almidón de yuca son las más claras, con una posible transmitancia de hasta un 95 % (Aristizábal & Sánchez, 2007). Otros almidones, como el de papa, presentan una transmitancia promedio del 72,1 % (Garnica et al., 2010), mientras que el almidón de trigo muestra valores entre el 60 y 65 %, y para el de maíz del 41 % (Craig et al., 1989). A partir de estos resultados, se puede inferir que los almidones de los dos clones de achira exhiben una alta

transparencia en sus pastas, superando la de almidones de papa, maíz o trigo y siendo similar a la de las pastas formadas con almidón de yuca. Estos hallazgos indican que las pastas de almidón de achira de este estudio son adecuadas para su aplicación en industrias como la alimentaria y la farmacéutica, donde la claridad y la transparencia son factores críticos.

**Tabla 4-11:** Transmitancia para el almidón de dos clones de achira.

Almidón de achira	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006
Transmitancia (%)	90,38 ± 1,12a	83,9 ± 1,85b

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

### 4.5.3 Perfil de textura

Los resultados del perfil de textura para los dos geles de almidón de achira se presentan en la Tabla 4-12, junto con valores de referencia para el almidón de maíz y trigo. Los valores de fracturabilidad y adhesividad de las muestras no se han incluido en el informe debido a que las mediciones no fueron consistentes o confiables, por lo que no se proporcionan en el informe para mantener la integridad de los resultados presentados. En lo que respecta a la dureza, se observaron diferencias significativas entre los clones analizados, siendo el clon 2007 – 006 el que mostró una mayor dureza que el clon 2008 – 001. Estas diferencias parecen estar relacionadas con la viscosidad de las pastas, ya que el clon 2007 – 006 presentó un pico de viscosidad más alto y una mayor retrogradación, considerando la posibilidad de obtener geles más firmes.

En comparación con otros estudios, Fonseca et al. (2017a) obtuvieron un valor de 36,71 gf en un ensayo con una relación del 5% sólidos para las pastas de almidón de achira, valor interior a los obtenidos en el presente estudio. Para las variedades Thai-green y Thai-purple, se informan valores de 1 915 y 1 963 gf, respectivamente, en pastas con un 6% de sólidos, superando las cifras registradas para los clones 2008 – 001 y 2007 – 006 (Chuenkamol et al., 2007; Saartrat et al., 2005). Estas diferencias pueden estar relacionadas con el contenido de amilosa que presentan las variedades y con la metodología de ensayo utilizada, ya que las variedades Thai-green y Thai-purple fueron comprimidas con un émbolo de menor diámetro que las muestras, lo que resultó en una fuerza mayor. Esta metodología también se aplicó para el almidón de achira para las

variedades San Gaban y Sandía en un estudio realizado en Perú, en el cual se obtuvieron valores de dureza de 3 528 y 815 gf, respectivamente (Cisneros et al., 2009).

**Tabla 4-12:** Perfil de textura para el almidón de dos clones de achira y otros almidones reportados en la literatura.

Almidón	Clon 2008 – 001	Clon 2007 – 006	Maíz (Xiao et al., 2022)	Trigo (Irani et al., 2019)	Trigo (Hedayati & Niakousari, 2018)
Dureza (gf)	235,65 ± 11,25a	326,16 ± 14,60b	175,45	101,00	249,00
Elasticidad	0,99 ± 0,01a	0,97 ± 0,02a	0,95	NR	0,98
Cohesividad	0,92 ± 0,01a	0,92 ± 0,02a	0,76	0,83	0,93
Gomosidad	217,32 ± 9,91a	299,79 ± 11,52b	88,95	83,33	232,00
Masticabilidad	214,09 ± 10,51a	291,76 ± 14,51b	70,03	NR	229,00
Resiliencia	0,76 ± 0,02a	0,76 ± 0,03a	0,61	0,82	NR

**Nota.** NR: no reporta. a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

Comparados con los almidones de maíz y trigo, los almidones de achira mostraron una mayor dureza en la mayoría de los casos. Para el almidón de maíz (con un 29% de amilosa) se prepararon geles de 6% de sólidos (Xiao et al., 2022) que mostraron una menor dureza en comparación con los almidones de achira. Esto se atribuye a la baja concentración de sólidos y al menor contenido de amilosa. Por otro lado, en el caso de almidón de trigo (con un 25% de amilosa), Irani et al. (2019) y Hedayati & Niakousari (2018) evaluaron pastas con un 15 % y 14 % de sólidos, respectivamente. A pesar de tener una mayor proporción de almidón, no superaron la dureza del almidón del clon 2007 – 006. De manera similar, el almidón de trigo tiene un contenido de amilosa inferior que el almidón de achira, lo que resulta en la formación de pastas menos firmes.

Para las propiedades de elasticidad, cohesividad y resiliencia de los geles de achira, no se observaron diferencias significativas entre ellas. Se destacó una alta elasticidad en las diferentes pastas de almidón (Tabla 4-12), siendo mayor en el clon 2008 – 001. En comparación, el almidón de yuca reporta un valor de elasticidad de 0,68 (Kayode et al., 2021), que es inferior a los valores observados en los almidones analizados. La elasticidad está relacionada con el contenido de amilosa del almidón, donde un mayor contenido de amilosa conlleva una mayor elasticidad (Kayode et al., 2021; Xiao et al., 2022).

La cohesividad en los almidones de achira mostró valores superiores a los del almidón de maíz, pero inferiores que el almidón de trigo. Fonseca et al. (2017a) reportó un valor de 0,33 para el almidón de achira cultivado en Colombia, que es inferior al valor encontrado en el presente estudio. En comparación con las pastas formadas por almidón de yuca, estas presentaron un valor menor de 0,70 (Kayode et al., 2021) en comparación con las pastas de otros almidones analizados. En la industria alimentaria, se busca una baja cohesividad para favorecer el cambio de textura, lo que es adecuado para alimentos masticables (Irani et al., 2019). Respecto a la resiliencia, indica la capacidad del gel para regresar a su estado original tras la compresión (Irani et al., 2019). Los almidones presentaron valores dentro del rango de los almidones de maíz y trigo, siendo este último el mayor valor reportado entre las tres especies, como se muestra en la Tabla 4-12.

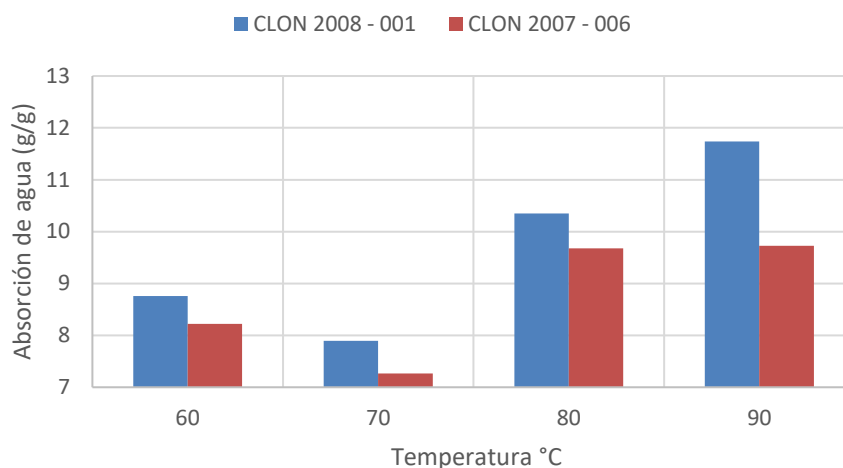
La gomosidad y masticabilidad están relacionadas con la dureza de las pastas (Hedayati & Niakousari, 2018; Piyachomkwan et al., 2002). La masticabilidad indica la fuerza necesaria para masticar un alimento hasta su desintegración, mientras que la gomosidad indica la energía necesaria para romper un alimento (Irani et al., 2019; Xie et al., 2022). Según lo que se observa en la Tabla 4-12, los valores más altos de estas propiedades se encontraron en el clon 2007 – 006, seguido por el almidón de trigo (Hedayati & Niakousari, 2018), el clon 2008 – 001 y, por último, el almidón de maíz (Xiao et al., 2022). Esto sugiere que los almidones de achira presentan una alta resistencia a la ruptura, lo que podría no ser favorable para su consumo como alimento.

## **4.6 Características funcionales**

### **4.6.1 Índice de absorción de agua**

En la Figura 4-8 se presenta el índice de absorción de agua de los almidones de achira a diferentes temperaturas. A medida que aumenta la temperatura, el almidón va absorbiendo más agua (Bertolini, 2010). Se observa este comportamiento para ambos almidones. Si bien el clon 2008 – 001 presenta valores superiores en las diferentes temperaturas en comparación con el clon 2007 – 006, no se presentan diferencias significativas entre ellos. Adicionalmente, se observa un aumento significativo en la absorción entre la temperatura de 70 °C a 90 °C, lo cual se debe a que supera la temperatura de gelatinización de los almidones (Tabla 4-10). Este comportamiento se atribuye a los cambios en la estructura molecular del almidón durante la gelatinización, con la amilosa y amilopectina

experimentando reorganización y expansión, generando una matriz gelatinosa con mayor afinidad para la absorción de agua. Al exceder la temperatura crítica de gelatinización, se intensifica este proceso, resultando en un notable aumento en la capacidad de absorción de agua del almidón. (Mendez et al., 2022; Pérez et al., 2016). De igual manera, se reportan estos cambios en estudios realizados por (Perez & Lares, 2005; Peroni et al., 2006; Yaruro et al., 2021).



**Figura 4-8:** Índice de absorción de agua a diferentes temperaturas para los almidones de achira. Elaboración propia.

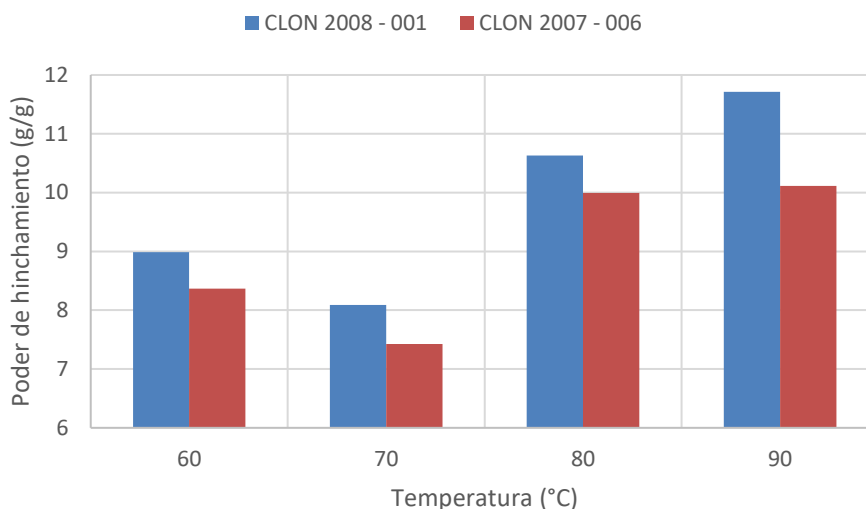
En comparación con otros estudios en el almidón de achira, Yaruro et al. (2021) reportan, para cuatro ecotipos colombianos, un rango entre 4 g/g a 10 g/g a la temperatura de 60 °C, mientras que Perez & Lares (2005) indica un valor de 13,4 g/g para una variedad cultivada en Venezuela. De acuerdo con estos valores, se puede apreciar que el almidón de los dos clones de achira se encuentra en el rango establecido por Yaruro et al. (2021) para las variedades colombianas. Por otro lado, estos mismos autores reportan, a la temperatura de 90 °C un intervalo entre 18,5 g/g 35,5 g/g (Yaruro et al., 2021), y 44,1 g/g (Perez & Lares, 2005), los cuales son superiores a los reportados para este estudio. Esto puede asociarse a la estructura química del gránulo del almidón y al tamaño de estos.

A partir de lo descrito anteriormente, el almidón del presente estudio no presenta un elevado índice de absorción de agua, en comparación con otras variedades de almidón de achira. Teniendo en cuenta esto, puede ser útil su aplicación en la fabricación de productos horneados para estabilizar la humedad.



### 4.6.2 Poder de hinchamiento

El poder de hinchamiento de los almidones de achira a diferentes temperaturas se encuentra en la Figura 4-9. Dado que se espera que el almidón aumente su capacidad de absorber agua a medida que la temperatura aumenta, se anticipa que el tamaño de los gránulos aumente a medida que la temperatura sube (Chiranthika et al., 2022; Leonel et al., 2021). Se observó este comportamiento en ambos casos, donde el clon 2008 – 001 mostró un rango superior en comparación con el clon 2007 – 006, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre ellos. Al igual que con el índice de absorción de agua se presenta un incremento a partir de la temperatura de 70 °C. Sin embargo, el clon 2007 – 006 no muestra un aumento significativo entre la temperatura de 80 y 90 °C. Esto se puede asociar a su baja temperatura de gelatinización y al tamaño más pequeño de sus gránulos (Fonseca et al., 2017a).



**Figura 4-9:** Poder de hinchamiento a diferentes temperaturas para los almidones de achira. Elaboración propia.

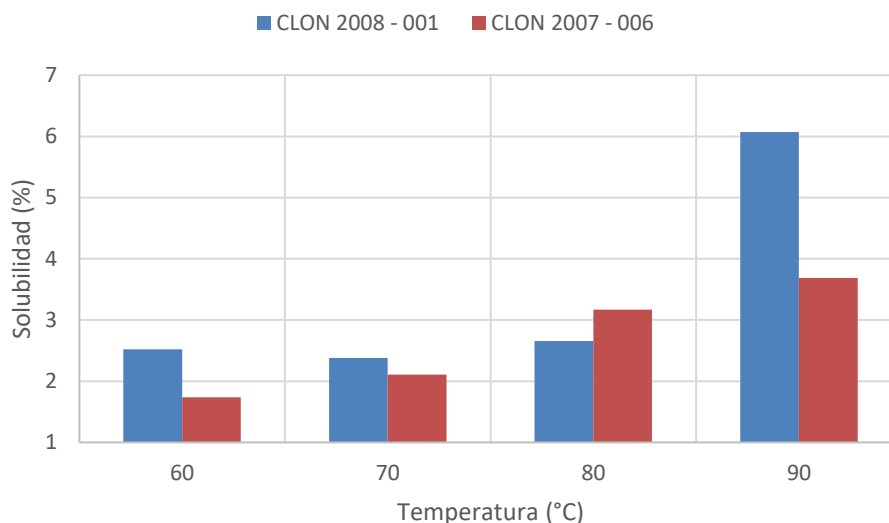
Algunos autores han reportado un alto poder de hinchamiento para el almidón de achira (Aprianita et al., 2014) como se presentó en la Tabla 2-5 en un estudio en Venezuela (14,4 – 45,1 g/g) (Perez & Lares, 2005) y en Colombia (variedad nativa huila: 3,5 – 40 g/g) (Yaruro et al., 2021). No obstante, los almidones del presente estudio indicaron un bajo poder de hinchamiento, similar al comportamiento observado para la variedad morada en Colombia (5 – 19,5 g/g) (Yaruro et al., 2021) y una variedad estudiada en China (5,22 – 17,08 g/g) (Zhang, Wang, & Yang, 2010). Estas diferencias se asocian al contenido de

amilosa, donde los almidones de achira con altos contenidos, presentan un poder de hinchamiento menor (Van & Morita, 2005). Según los resultados presentados, se infiere que los almidones de los dos clones de achira muestran un bajo poder de hinchamiento, lo cual es ideal para evitar una expansión excesiva en la fabricación de productos de panadería o fideos (Aprianita et al., 2014).

### 4.6.3 Índice de solubilidad

En la Figura 4-10 se presenta el índice de solubilidad del almidón de dos clones de achira a diferentes temperaturas. Teniendo en cuenta que los gránulos del almidón son insolubles en agua fría por su estructura altamente ordenada (Obadi et al., 2023) se espera que la solubilidad de los almidones aumente a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento se observó en los dos almidones de achira, y no se observaron diferencias significativas entre estos. El clon 2007 – 006 mostró una mayor solubilidad a la temperatura de 80 °C, mientras que, a 90 °C, el clon 2008 – 001 mostró el doble de solubilidad que el almidón del clon 2007 – 006.

A pesar del notable aumento en la solubilidad que presenta el clon 2008 – 001 con respecto al clon 2007 – 006, es el más bajo reportado en la literatura (Tabla 2-5). Zhang, Wang, & Yang (2010) informan que la temperatura tiene un efecto pronunciado en el aumento de la solubilidad del almidón de achira (9,08 – 67,22 %). Por otro lado, la variedad morada en Colombia muestra un comportamiento similar al de los almidones del presente estudio (2 – 8 %) (Yaruro al., 2021), al igual que la variedad nativa huila (2,5 – 11,5 %). La solubilidad también se utiliza para determinar el grado de interacción del almidón en sus estados amorfo y cristalino, resultado de la interacción entre la amilosa y la amilopectina. Por lo tanto, posiblemente las diferencias presentadas entre los almidones del presente estudio, pueden asociarse a la cristalinidad, el tamaño de las moléculas y longitud de las cadenas de amilopectina (Obadi et al., 2023).



**Figura 4-10:** Índice de absorción de agua a diferentes temperaturas para los almidones de achira. Elaboración propia.

#### 4.6.4 Capacidad de retención de agua y aceite

Los resultados de las propiedades de capacidad de retención de agua (CRA) y la capacidad de retención de aceite (CRL) encontrados para el almidón de los clones de achira se presentan en la Tabla 4-13. En lo que respecta a estas características, no se observaron diferencias significativas entre las medias analizadas. En particular, la capacidad de retención de agua exhibida por los clones es inferior al valor de 0,8 g/g informado para el almidón de achira estudiado en Indonesia (Purwitasari et al., 2023), y también es menor que el valor de 1,3 g/g observado en el almidón de achira estudiado en China (Zhang, Wang, & Yang, 2010). Estas discrepancias entre las investigaciones pueden atribuirse a diferencias en el contenido de amilosa, el tamaño de los gránulos y su estructura molecular (Aprianita et al., 2014; Salazar et al., 2021). Una alta CRA puede indicar una baja sinéresis, lo cual es deseable en la formulación de productos desintegrantes, con texturas jugosas y para prolongar la vida útil al reducir la pérdida de humedad durante el almacenamiento (Jaramillo, 2013; Ospitia, 2019).

En cuanto a la capacidad de retención de aceite (CRL), el almidón del clon 2008 – 001 mostró un valor superior en comparación con el clon 2007 – 006 y, además, superó el almidón de achira estudiado en Indonesia (0,7 g/g) (Purwitasari et al., 2023). El almidón estudiado por Zhang, Wang, & Yang (2010) presentó una alta retención de lípidos, con un valor de 1,85 g/g. Las diferencias observadas se relacionan principalmente con la amilosa

y el contenido de proteínas amorfas (Chiranthika et al., 2022). Los productos con una alta CRL, como es el caso del almidón del clon 2008 – 001, que muestra propiedades lipofílicas, puede emplearse como ingrediente estabilizante en alimentos con un alto porcentaje de grasa y emulsión (Fuentes et al., 2019).

**Tabla 4-13:** Resultados de la capacidad de retención de agua y aceite del almidón de dos clones de achira.

Almidón de achira	CRA (g/g)	CRL (g/g)
Clon 2008 – 001	0,73 ± 0,04a	0,81 ± 0,18a
Clon 2007 – 006	0,74 ± 0,02a	0,66 ± 0,02a

**Nota.** a – b: Valores diferentes dentro de una misma fila indican diferencias significativas.

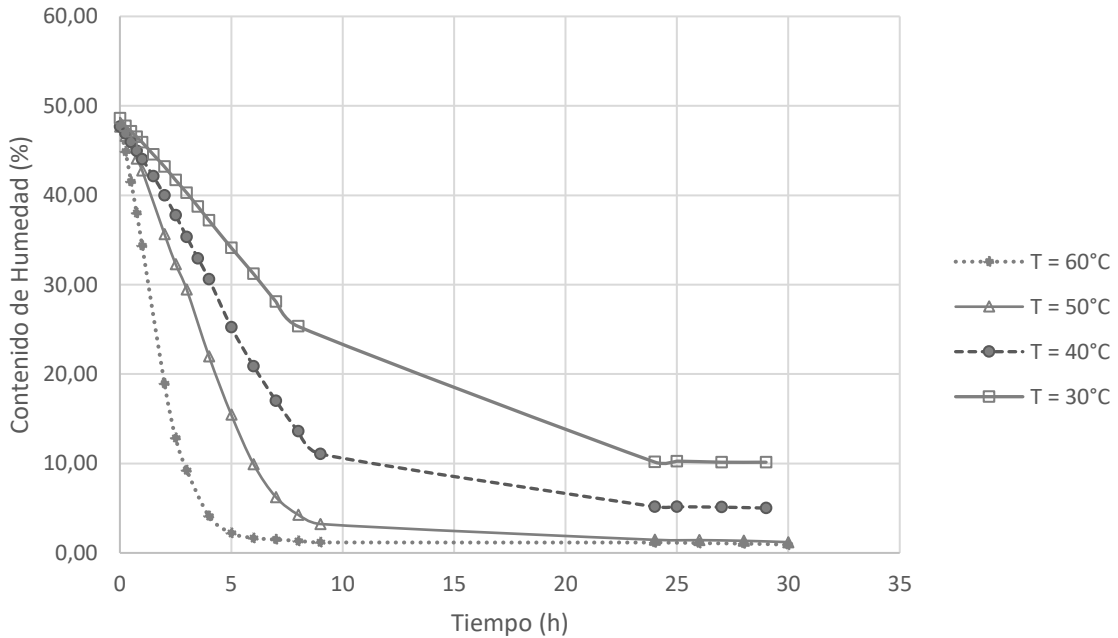
## 4.7 Curvas de secado e isotermas de sorción

### 4.7.1 Curvas de secado

Los resultados de las curvas de secado se presentan en la Figura 4-11 y la Figura 4-12. El secado a las temperaturas de 50 °C y 60 °C muestran una pendiente distintiva para cada una de ellas y se destaca que el contenido de humedad alcanzado por la muestra para este ensayo es inferior al 1 %, presentando una mayor eficiencia del proceso. En contraste, a 40 °C y 30 °C, se alcanzaron contenidos de humedad en equilibrio aproximados del 5 % y 10 %, respectivamente. Cabe mencionar que, aunque no es posible determinar con precisión el tiempo exacto en el que las curvas a 30 °C y 40 °C alcanzan la humedad de equilibrio con el ambiente del horno, se puede inferir que dicho tiempo es inferior a 15 horas. Esta inferencia se basa en la observación de las gráficas, donde indica que después de este período, el contenido de humedad no experimenta cambios significativos durante los experimentos, lo cual se atribuye a las limitaciones temporales, especialmente durante las horas nocturnas, donde no se pudo realizar mediciones precisas.

El fenómeno observado se atribuye a la elevada humedad relativa presente en el entorno, la cual, afectó la cantidad de humedad presente en el aire durante el proceso de secado. El análisis psicrométrico reveló que el aire ambiente tenía una temperatura promedio de 18 °C y una humedad relativa promedio del 75 %. A medida que se realizaba un calentamiento sensible, la masa de aire redujo su humedad hasta alcanzar valores cercanos al 20 % para la temperatura de 40 °C y al 35 % para el calentamiento a 30 °C.

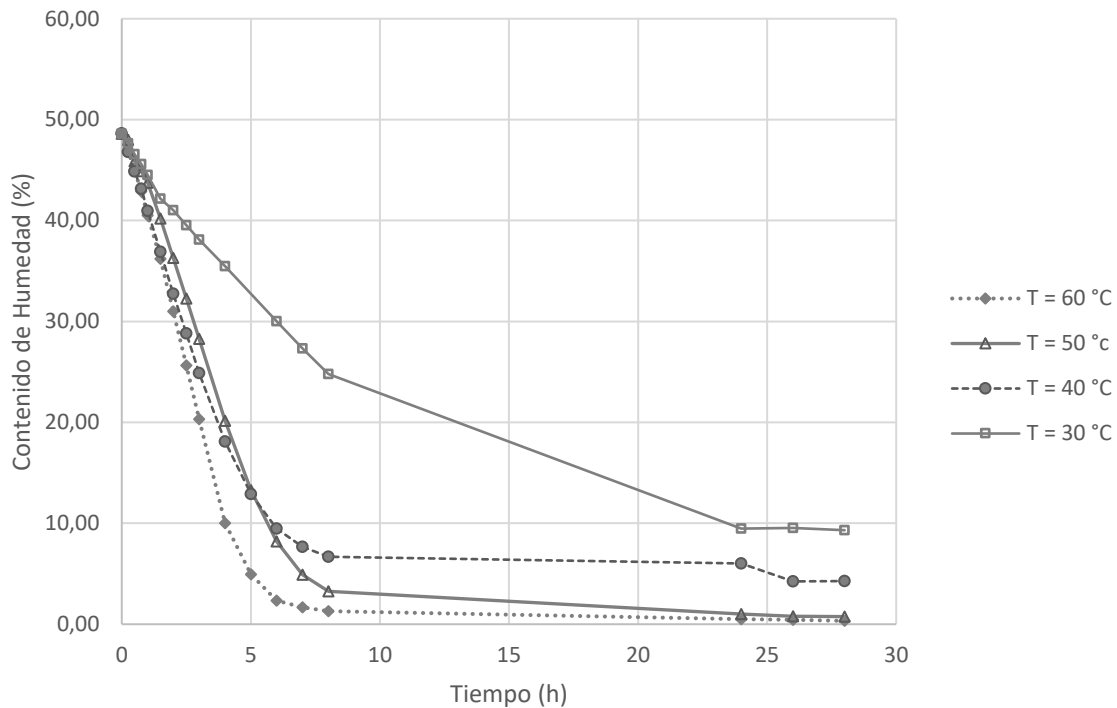
Es importante destacar que a medida que el aire se calienta, se dilata, aumentando su capacidad de absorción, ya que se aleja de la condición de saturación. Este fenómeno intensifica la fuerza motriz que impulsa el proceso de secado. En consecuencia, conforme se alcanzan temperaturas de 50 y 60 °C, la humedad relativa disminuye, lo que conlleva a un aumento significativo en la capacidad de secado, tal como se evidencia en la Figura 4-11, en línea con las expectativas previas.



**Figura 4-11:** Curvas de secado a diferentes temperaturas para del clon 2008 – 001.

Durante las primeras 8 horas del secado, se evidencian diferencias en las pendientes en cada temperatura en las curvas presentadas para el clon 2008 – 001 (Figura 4-11). Al finalizar el secado, el contenido de humedad que alcanzan las muestras de almidón es del 10 % a una temperatura de 30 °C, del 5 % a 40 °C y del 1 % a 50 °C y 60 °C. Por otro lado, para el clon 2007 – 006, se observa una pendiente similar para las temperaturas de 40 °C y 50 °C durante las primeras 6 horas de secado (Figura 4-12). A partir de ese punto, se notan cambios en las pendientes para estas temperaturas. El contenido de humedad en equilibrio es del 9,3 % a 40 °C, del 4,3 % a 50 % y del 1 % a 50 °C y 60°C.

Con el propósito de observar el comportamiento del almidón de achira en ambientes con diferente humedad relativa, se plantea el desarrollo de isotermas de sorción para determinar la reacción de este producto.



**Figura 4-12:** Curvas de secado a diferentes temperaturas para el clon 2007 – 006.

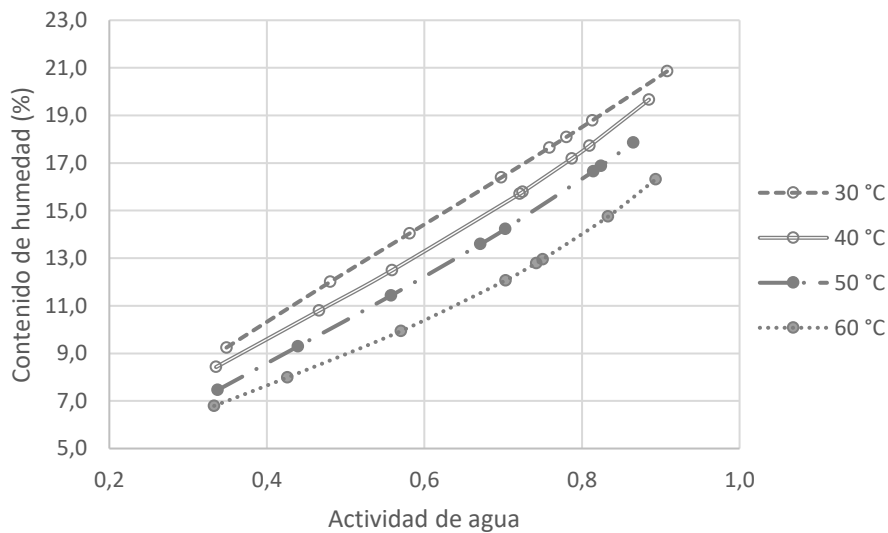
#### 4.7.2 Isotermas de sorción

Las isotermas de sorción de los almidones de achira se presentan en la Figura 4-13 y Figura 4-14. Para el ajuste de los datos obtenidos, se emplearon tres modelos matemáticos comúnmente usados en el ajuste de isotermas de sorción: el modelo de Oswin, GAB y Smith. Los valores de sus constantes se encuentran en las tablas Tabla 4-14 y Tabla 4-15. De estos, el que presentó mejores resultados de ajuste, según el análisis de la suma de los errores al cuadrado, fue el modelo de GAB. Según las formas de las isotermas en la literatura, se considera que las isotermas obtenidas son de tipo lineal (Tien, 2019). Este comportamiento particular se ha reportado para materiales particulados y con poros pequeños y de tamaño uniforme, con propiedades de sorción selectiva (Tien, 2019; Villa et al., 2020). Por otro lado, se observa una pendiente similar para las diferentes temperaturas de ensayo, con un comportamiento directamente proporcional entre la actividad de agua ( $A_w$ ) y el contenido de humedad. Con respecto a la temperatura, se observa un comportamiento inversamente proporcional, donde a medida que aumenta la

temperatura, el contenido de humedad de los almidones, disminuye. Además, no se presentaron diferencias entre los almidones analizados.

**Tabla 4-14:** Constantes determinadas para los modelos evaluados para el clon 2008 - 001.

Modelo	Constantes	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Oswin	A	12,673	11,497	10,319	9,067
	B	0,247	0,287	0,318	0,295
GAB	Xm	18,714	11,841	12,449	7,455
	K	0,388	0,550	0,520	0,646
	C	4,762	6,113	4,587	9,173
Smith	K <sub>1</sub>	8,374	6,843	5,699	5,284
	K <sub>2</sub>	5,918	6,439	6,464	5,241



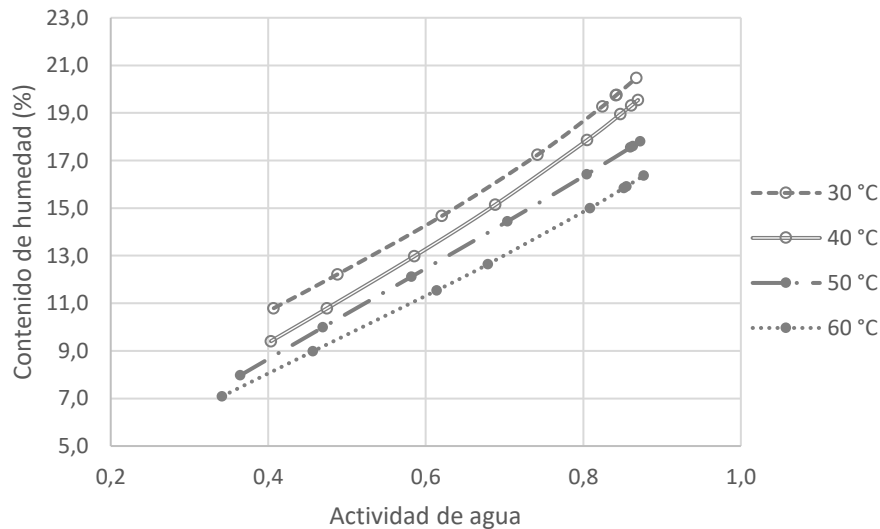
**Figura 4-13:** Ajuste del modelo de GAB para las isotermas del clon 2008 – 001.

En relación con los resultados obtenidos, el contenido de humedad que alcanzan los almidones con un Aw superior a 0,8 representan un factor de riesgo significativo en términos del crecimiento microbiológico y la calidad del alimento. Este nivel de actividad acuosa crea condiciones propicias para el desarrollo de microorganismos, aumentando la posibilidad de deterioro y afectando la seguridad y estabilidad del producto. Las isotermas de sorción muestran que, a un contenido de humedad del 20%, la actividad de agua (Aw) supera 0,8, lo que no es propicio para la conservación del almidón. Esta observación concuerda con la norma NTC 3228, que sugiere un límite máximo del 20% de humedad

para preservar la calidad del almidón y prolongar su vida útil. Particularmente, se observa este comportamiento para la temperatura de 30 °C en ambos casos. Por otra parte, en valores de  $A_w$  inferiores a 0,5 se observa una disminución del contenido de humedad, especialmente para la temperatura de 60 °C, lo que podría favorecer la conservación del producto por más tiempo. Es importante resaltar que a medida que aumenta la temperatura, disminuye el tiempo que tarda la muestra en llegar al equilibrio.

**Tabla 4-15:** Constantes determinadas para los modelos evaluados para el clon 2007 - 006.

Modelo	Constantes	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
Oswin	A	12,493	11,415	10,546	9,625
	B	0,275	0,295	0,287	0,287
GAB	Xm	11,251	13,350	19,009	12,090
	K	0,583	0,525	0,369	0,482
	C	8,776	4,654	3,668	4,869
Smith	K <sub>1</sub>	7,978	6,786	6,391	5,791
	K <sub>2</sub>	6,415	6,492	5,802	5,330



**Figura 4-14:** Ajuste del modelo de GAB para las isotermas del clon 2007 – 006.

Es importante tener conocimiento de la temperatura en relación con las isotermas de sorción, ya que los alimentos experimentan variaciones de temperatura durante los procesos y el almacenamiento. En la descripción de la isoterma de sorción, es necesario mantener constante la temperatura, ya que esta afecta la movilidad de las moléculas de



agua y el equilibrio dinámico entre el vapor y la sorción en las fases (Tien, 2019; Villa et al., 2020). Una de las aplicaciones de este ensayo se enfoca en la predicción de cambios en los alimentos, la selección adecuada del método de almacenamiento, el embalaje, diseño y optimización de procesos de secado, vida útil y almacenamiento (Ramírez et al., 2014; Silveira et al., 2010).

## **4.8 Aplicaciones del almidón obtenido de los clones estudiados**

Teniendo en cuenta las propiedades analizadas de los almidones de dos clones de achira, se presenta las tablas Tabla 4-16 y Tabla 4-17, con un listado de los posibles usos que pueden tener los almidones estudiados en algunas industrias analizadas. Estos usos se basan en la aplicación específica que se busca en los almidones para su procesamiento. Por ello, se indica la característica deseada en la industria y la propiedad del almidón apta para su uso.

En general, las características fisicoquímicas presentadas por ambos almidones fueron similares entre ellos y coincidieron con algunos valores reportados en la literatura. Conviene subrayar que la achira del clon 2008 – 001 y el clon 2007 – 006 son una buena fuente de almidón y contienen iguales cantidades de amilosa ( $\approx 32\%$ ). Ambos clones tienen un gran contenido de minerales, un pH ligeramente ácido ( $\approx 6,1$ ), una actividad de agua moderada ( $\approx 0,6$ ) y un alto índice de blancura ( $\approx 92\%$ ). En cambio, solo el clon 2008 – 001 cuenta con un análisis proximal que cumple con la mayoría de los requisitos de la norma (NTC 3228), pero con una densidad menor que el clon 2007 – 007. Finalmente, el clon 2007 – 006 cuenta con un elevado contenido de hierro (Fe) y con algunas partículas de silicio que afectan su apariencia.

En relación con las características morfológicas, ambos clones presentaron un gránulo de una superficie lisa y regular, similar a lo reportado en la literatura. De igual modo, estos almidones reportan gránulos de gran tamaño, lo cual coincide con lo informado. No obstante, el clon 2008 – 001 presentó una forma más ovalada de los gránulos, mientras que el clon 2007 – 006 informó una forma más redonda. Adicionalmente, este último presentó un menor porcentaje de cristalinidad ( $21,7\%$ ) que permite inferir una mejor asimilación por el organismo humano.

**Tabla 4-16:** Aplicaciones del almidón del clon 2008 - 001 en algunas industrias.

Industria	Propiedad	Aplicación
Alimentaria	Espesante Gelificante Aglutinante Absorbente Excipiente Formación de películas	Bebidas, salsas, productos con viscosidad estable Texturas suaves como papillas , cremas, geles débiles Conservas, con pastas claras Recubrimiento claro para alimentos Adsorbente lipofílico Procesamiento a altas temperaturas, apto para congelados Horneados con poca capacidad de expansión y texturas suaves Alimentos ricos en nutrientes, especialmente en: N, P, Mg, Zn
Cosmética	Absorbente Gelificante Espesante Excipiente	Geles de texturas suaves Adsorbente de grasa Espesante en cremas, jabones, shampoo, entre otros Coloración clara para mejorar la apariencia de los pigmentos y la adherencia de los colores Elaboración de formulaciones sostenibles
Farmacéutica	Control de humedad Aglutinante Viscosidad estable Formación de películas	Recubrimientos claros Alta densidad para el control de humedad en productos deshidratados Recubrimientos claros, recubrimientos digeribles y claros para medicamentos Viscosidad controlada para formulaciones líquidas
Textil	Agente de apresto Antiadherente para la fabricación de capas de tejido	Mayor claridad y aumento en la absorción de colorantes Material antiadherente para la fabricación de las capas de tejido Agente de acabado para brindar más brillo y suavidad
Papel, cartón y ligantes	Aglutinante Cohesividad Claridad de las pastas	Pastas claras y baja retrogradación que conserva la transparencia con el tiempo Aglutinante en la fabricación de papel y cartón

En cuanto a las propiedades térmicas y reológicas de los almidones, el clon 2008 – 001 (67,6 °C) presentó una mayor temperatura de gelatinización que el clon 2007 – 006 (63,3 °C). Esto influyó en el comportamiento reológico, donde el clon 2007 – 006 (427 UB) presentó una viscosidad más alta en comparación. Adicionalmente, este último formó geles

más firmes según el perfil de textura. Por último, el clon 2008 – 001 fue el que formó pastas más claras que el clon 2007 – 006, y a su vez, ambos presentaron baja retrogradación lo cual no afectó la transparencia de las soluciones.

**Tabla 4-17:** Aplicaciones del almidón del clon 2007 - 006 en algunas industrias.

Industria	Propiedad	Aplicación
Alimentaria	Espesante Gelificante Aglutinante Absorbente Excipiente	Bebidas, salsas, productos con viscosidad estable Pudines, geles firmes y viscosos Mermeladas, salsa, pastas más oscuras Adsorbente hidrofílico Procesamiento a bajas temperaturas Horneados con poca capacidad de expansión y texturas suaves Alimentos ricos en nutrientes, especialmente en: Ca, Fe
Cosmética	Absorbente Gelificante Espesante Excipiente	Geles de texturas suaves Espesante en cremas, jabones, shampoo, entre otros Elaboración de formulaciones sostenibles
Farmacéutica	Control de humedad Aglutinante Viscosidad estable	Más fácil de digerir, para una liberación controlada de medicamentos Alta densidad para el control de humedad en productos deshidratados Excipiente para formación de comprimidos fuertes Viscosidad controlada para formulaciones líquidas
Textil	Agente de apresto Antiadherente para la fabricación de capas de tejido	Agente de apresto para dar mayor rigidez a las telas Material antiadherente para la fabricación de las capas de tejido
Papel, cartón y ligantes	Aglutinante Cohesividad	Mayor contenido de lípidos Aglutinante, mayor resistencia a la manipulación y durabilidad Alta cohesividad para el pegado de capas de papel en la fabricación de cartón Mayor resistencia a la manipulación y durabilidad Viscosidad estable en la formulación de papel

Con respecto a las características funcionales, no se observaron diferencias entre el almidón de los clones en su índice de absorción de agua, poder de hinchamiento, índice de solubilidad, capacidad de retención de agua y aceite. Por otra parte, se observa que los

almidones presentan una baja retención y/o capacidad para estas propiedades, en comparación con otros estudios. Sin embargo, según las curvas e isothermas analizadas, es un material altamente higroscópico, característica que debe tenerse en cuenta para la manipulación o el almacenamiento.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

El presente estudio reporta una exhaustiva caracterización de los almidones de achira (*Canna edulis*), identificados como clon 2008 – 001 y clon 2007 – 006. Estos almidones arrojaron diferencias en su composición proximal, mineral y morfológica, las cuales consecuentemente afectaron algunas de las propiedades térmicas, reológicas y funcionales de las pastas de almidón. El clon 2007 – 006 presentó una tonalidad más oscura a causa de algunas partículas de silicio, que influyeron en el color y la claridad de las pastas. No obstante, en otras características determinantes en las propiedades funcionales no reportaron diferencias significativas, como fue el caso del contenido de amilosa. Por lo tanto, las diferencias encontradas en las propiedades tanto térmicas, reológicas y funcionales entre estos dos almidones pueden ser explicadas por las diferencias en la morfología y estructura cristalina que presentaron estos almidones.

Por otro lado, los almidones estudiados exhiben características distintivas en comparación con otras especies documentadas dentro de la familia *Canna edulis* en variedades orientales. No obstante, muestran algunas similitudes con los cultivos de origen latino, lo cual sugiere la posible influencia de las condiciones edafoclimáticas en sus propiedades. Este hallazgo plantea la necesidad de investigaciones adicionales para profundizar en el papel de las condiciones ambientales en la composición y comportamiento del almidón de achira.

Finalmente, se identificaron algunas industrias que emplean el almidón como materia prima entre las cuales cabe mencionar, la industria alimentaria, la cosmética, la farmacéutica, la textil y la de papel, cartón y ligantes. Se identificaron los productos en los que se emplean y la funcionalidad del almidón en estos. Particularmente, se observaron que los almidones tienen un alto potencial de aplicación en la industria alimentaria, farmacéutica y de papel.

## 5.2 Recomendaciones

Para lograr una mayor comprensión de las características fisicoquímicas que pueden afectar las propiedades de los almidones, se recomienda estudiar la composición de las cadenas de glucosa que conforman la amilosa y la amilopectina. Es importante destacar que la gelatinización ocurre con la absorción de las moléculas de agua en los enlaces de puente hidrógeno, lo que permite que el gránulo de almidón se hinche. Por lo tanto, aunque se obtuvo el mismo contenido de amilosa, no se comprende completamente la interacción molecular que resultó en las diferencias observadas en las propiedades térmicas y reológicas.

Para abordar la funcionalidad de los almidones de manera más específica, se recomienda seleccionar una única aplicación y llevar a cabo ensayos que permitan evaluar su viabilidad en la elaboración de un producto específico. Este enfoque de investigación permitirá formular hipótesis más precisas sobre los resultados y proporcionará un criterio más sólido para respaldar su uso. Se sugiere realizar investigaciones adicionales para profundizar en las aplicaciones en los sectores alimentario, farmacéutico y de papel, con el fin de comprender mejor la funcionalidad del almidón en cada uno de ellos. Además, se recomienda realizar estudios que proporcionen información detallada sobre la estabilidad y los cambios del almidón durante el almacenamiento a lo largo del tiempo.

## Bibliografía

- Acuña Pinto, H. M. (2012). *Extracción, caracterización y aplicación de almidón de ñame variedad blanco (dioscorea trifida) originario de la región amazónica colombiana para la elaboración de productos horneados* [Universidad Nacional de Colombia]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/9785/>
- Aleixandre, A., & Rosell, C. M. (2022). Starch gels enriched with phenolics: Effects on paste properties, structure and digestibility. *Lwt*, 161(October 2021), 113350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113350>
- Alvis, A., Vélez, C. A., Villada, H. S., & Rada-Mendoza, M. (2008). Análisis Físico-Químico y Morfológico de Almidones de Ñame, Yuca y Papa y Determinación de la Viscosidad de las Pastas Physicochemical and Morphological Analyses of Yam, Cassava and Potato Starches and Determination of their Viscosity. *Información Tecnológica*, 19(1), 19–28.
- Anderson, R. A., Conway, H. F., & Peplinski, A. J. (1970). Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking and Steaming. In *Starch - Stärke* (Vol. 22, Issue 4). <https://doi.org/10.1002/star.19700220408>
- AOAC. (2019). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists: Official Methods of Analysis of AOAC International* (21st Editi). AOAC.
- AOAC INTERNATIONAL. (1997). *Official Method 996.11 : Starch (Total) in Cereal Products - Amyloglucosidase- -Amylase Method. First Action 1996 AOAC-AACC Method, 32.2.05<sup>a</sup>*. In *Journal of AOAC International*.
- Aprianita, A., Vasiljevic, T., Bannikova, A., & Kasapis, S. (2014). Physicochemical properties of flours and starches derived from traditional Indonesian tubers and roots. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3669–3679. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0915-5>
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. *Fao*, 163, 134. <https://doi.org/9253056770-9789253056774>
- Ávila Martín, L. (2018). *Efecto de la adición de ácido cítrico y proteína de lactosuero en la elaboración de películas basadas en almidón de Canna indica L* [Universidad

- Nacional de Colombia].  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/68666/1015401865.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bertolini, A. (2010). *Starches: Characterization, properties, and applications*. CRC Press, Taylor & Francys group.
- Caicedo, G., Rozo, S., & Rengifo, G. (2003). La Achira: Alternativa agroindustrial para áreas de economía campesina. In *Corpoica*. CORPOICA.
- Canton Trevisol, T., Oliveira Henriques, R., Antunes Souza, A. J., Cesca, K., & Furigo, A. (2023). Starch- and carboxymethyl cellulose-based films as active beauty masks with papain incorporation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231(July 2022), 123258. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123258>
- Chai, K., Lu, K., Xu, Z., Tong, Z., & Ji, H. (2018). Rapid and selective recovery of acetophenone from petrochemical effluents by crosslinked starch polymer. *Journal of Hazardous Materials*, 348(July 2017), 20–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.034>
- Chen, N., Wang, Q., Wang, M. X., Li, N. yang, Briones, A. V., Cassani, L., Prieto, M. A., Carandang, M. B., Liu, C., Gu, C. M., & Sun, J. Y. (2022). Characterization of the physicochemical, thermal and rheological properties of cashew kernel starch. *Food Chemistry: X*, 15(July), 100432. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100432>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.003>
- Chibuogwu, C., Amadi, B., Anyaegbunam, Z., Emesiani, B., & Ofoefule, S. (2019). Application of Starch and Starch Derivatives in Pharmaceutical Formulation. *IntechOpen*, 13.  
<http://dx.doi.org/10.1039/C7RA00172J%0Ahttps://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.014>
- Chiranthika, N. N. G., Chandrasekara, A., & Gunathilake, K. D. P. P. (2022). Physicochemical characterization of flours and starches derived from selected underutilized roots and tuber crops grown in Sri Lanka. *Food Hydrocolloids*, 124(PA), 107272. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107272>
- Choque-Quispe, D., Ligarda-Samanez, C. A., Ramos-Pacheco, B. S., Taípe-Pardo, F., Peralta-Guevara, D. E., & Solano Reynoso, A. M. (2019). Evaluación de las



- isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista ION*, 31(2), 67–81. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018005>
- Chuenkamol, B., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., & Uttapap, D. (2007). Characterization of low-substituted hydroxypropylated canna starch. *Food Hydrocolloids*, 21(7), 1123–1132. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.08.013>
- Cisneros, F. H., Zevillanos, R., & Cisneros-Zevallos, L. (2009). Characterization of starch from two ecotypes of andean achira roots (*Canna edulis*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(16), 7363–7368. <https://doi.org/10.1021/jf9004687>
- Craig, S. A. S., Maningat, C. C., Seib, P. A., & Hosney, R. C. (1989). Starch paste clarity. In *Cereal Chem* (Vol. 66, Issue 3, pp. 173–182).
- Cui, C., Jia, Y., Sun, Q., Yu, M., Ji, N., Dai, L., Wang, Y., Qin, Y., Xiong, L., & Sun, Q. (2022). Recent advances in the preparation, characterization, and food application of starch-based hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 291(May). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119624>
- Digaitis, R., Falkman, P., Oltner, V., Briggner, L. E., & Kocherbitov, V. (2022). Hydration and dehydration induced changes in porosity of starch microspheres. *Carbohydrate Polymers*, 291(February), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119542>
- Enesi, R. O., Pypers, P., Kreye, C., Tariku, M., Six, J., & Hauser, S. (2022). Effects of expanding cassava planting and harvesting windows on root yield, starch content and revenue in southwestern Nigeria. *Field Crops Research*, 286(July), 108639. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108639>
- Fan, D., Liu, Y., Hu, B., Lin, L., Huang, L., Wang, L., Zhao, J., Zhang, H., & Chen, W. (2016). Influence of microwave parameters and water activity on radical generation in rice starch. *Food Chemistry*, 196, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.012>
- FAOSTAT. (2020). *Datos sobre alimentación y agricultura. Producción de cultivos*. FAO. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fonseca-Florido, H. A., Gómez-Aldapa, C. A., Velazquez, G., Hernández-Hernández, E., Mata-Padilla, J. M., Solís-Rosales, S. G., & Méndez-Montealvo, G. (2017a). Gelling of amaranth and achira starch blends in excess and limited water. *Lwt*, 81, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.061>
- Fonseca-Florido, H. A., Gómez-Aldapa, C. A., Velazquez, G., Hernández-Hernández, E., Mata-Padilla, J. M., Solís-Rosales, S. G., & Méndez-Montealvo, G. (2017b). Gelling

- of amaranth and achira starch blends in excess and limited water. *LWT - Food Science and Technology*, 81, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.061>
- Fuentes, C., Perez-Rea, D., Bergenståhl, B., Carballo, S., Sjöo, M., & Nilsson, L. (2019). Physicochemical and structural properties of starch from five Andean crops grown in Bolivia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 829–838. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.120>
- García Acosta, O. R., Pinzón Fandiño, M. I., & Sánchez Ante, L. T. (2013). Extracción y propiedades funcionales del almidón de yuca, manihot esculenta, variedad ica, como materia prima para la elaboración de películas comestibles. *@limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 11(1), 13–21. [http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs\\_viceinves/index.php/ALIMENTECH/article/view/382](http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/ALIMENTECH/article/view/382)
- García, Y., Cabrera, D., & Fuenmayor, C. A. (2020). *Obtención y caracterización de harinas compuestas de Cucurbita moschata D. y Cajanus cajan L. como fuentes alternativas de proteína y vitamina A* Obtaining and characterizing composite flours from *Cucurbita moschata D.* *Obtención de harinas*. 69, 89–96. <https://doi.org/0.15446/acag.v69n2.80412>
- Garnica, A. M., Romero, A. R., Cerón, M. D. S., & Prieto Contreras, L. (2010). Características funcionales de almidones nativos extraídos de clones promisorios de papa (*Solanum tuberosum* L. subespecie andigena ) para la industria de alimentos. *Revista Alimentos Hoy*, 19(21), 3–15. <http://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/1/10>
- Granados, C., Guzmán, L., Acevedo, D., Díaz, M., & Herrera, A. (2014). PROPIEDADES FUNCIONALES DEL ALMIDON DE SAGU (*Maranta arundinacea*). *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2), 90–96. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612014000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612014000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Guízar Miranda, A., Montañéz Sotoa, J. L., & García Ruiza, I. (2008). Parcial caracterización de nuevos almidones obtenidos del tubérculo de camote del cerro (*Dioscorea* spp). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 9(March 2014), 81–88.
- Gupta, S., Sharma, S., Kumar Nadda, A., Saad Bala Husain, M., & Gupta, A. (2022). Biopolymers from waste biomass and its applications in the cosmetic industry: A review. *Materials Today: Proceedings*, 68, 873–879.

- <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.422>
- Gutiérrez, T. J. (2018). Biological Macromolecule Composite Films Made from Sagu Starch and Flour / Poly (  $\epsilon$ -Caprolactone ) Blends Processed by Blending / Thermo. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(9), 3902–3912. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1268-6>
- Hedayati, S., & Niakousari, M. (2018). Microstructure, pasting and textural properties of wheat starch-corn starch citrate composites. *Food Hydrocolloids*, 81, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.024>
- Herceg, Z., Batur, V., Jambrak, A. R., Badanjak, M., Brnčić, S. R., & Lalas, V. (2010). Modification of rheological, thermophysical, textural and some physical properties of corn starch by tribomechanical treatment. *Carbohydrate Polymers*, 80(4), 1072–1077. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.01.026>
- Hernández Medina, M., Torruco Uco, J. G., Chel Guerrero, L., & Betancur Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 28(3), 718–726. <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, 253–267.
- Hoseney, R. C. (1991). *Principios de ciencia y tecnología de los cereales* (S. A. ACRIBIA (ed.)). American Association of Cereals Chemists.
- Huang, Y., Jin, Y., Fang, Y., Li, Y., & Zhao, H. (2013). Simultaneous utilization of non-starch polysaccharides and starch and viscosity reduction for bioethanol fermentation from fresh *Canna edulis* Ker. tubers. *Bioresource Technology*, 128, 560–564. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.134>
- Irani, M., Razavi, S. M. A., Abdel-Aal, E. S. M., Hucl, P., & Patterson, C. A. (2019). Viscoelastic and textural properties of canary seed starch gels in comparison with wheat starch gel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.216>
- Jan, N., Naik, H. R., Gani, G., Bashir, O., Amin, T., Wani, S. M., & Sofi, S. A. (2022). Influence of replacement of wheat flour by rice flour on rheo - structural changes , in vitro starch digestibility and consumer acceptability of low - gluten pretzels. *Food Production, Processing and Nutrition*, 4(9), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s43014->

022-00088-y

- Jaramillo Montenegro, L. P. (2013). *Obtención de almidones modificados de achira y caracterización de sus propiedades de interés en la industria de alimentos* [Universidad del Valle]. <https://doi.org/10.1190/segam2013-0137.1>
- Kaur, L., Singh, J., & Liu, Q. (2007). Starch - A potential biomaterial for biomedical applications. *Nanomaterials and Nanosystems for Biomedical Applications*, 83–98. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6289-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6289-6_5)
- Kaur, P., Kaur, K., Basha, S. J., & Kennedy, J. F. (2022). Current trends in the preparation, characterization and applications of oat starch — A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 212(March), 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.117>
- Kayode, B. I., Kayode, R. M. O., Salami, K. O., Obilana, A. O., George, T. T., Dudu, O. E., Adebo, O. A., Njobeh, P. B., Diarra, S. S., & Oyeyinka, S. A. (2021). Morphology and physicochemical properties of starch isolated from frozen cassava root. *LWT*, 147, 111546. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111546>
- Kheto, A., Das, R., Deb, S., Bist, Y., Kumar, Y., Tarafdar, A., & Saxena, D. C. (2022). Advances in isolation, characterization, modification, and application of Chenopodium starch: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 222(PA), 636–651. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.191>
- Kuakpetoon, D., & Wang, Y. J. (2001). Characterization of different starches oxidized by hypochlorite. *Starch/Staerke*, 53(5), 211–218. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200105\)53:5<211::AID-STAR211>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200105)53:5<211::AID-STAR211>3.0.CO;2-M)
- Lan, T., Wang, J., Lei, Y., Lei, J., Sun, X., & Ma, T. (2023). A new source of starchy flour : Physicochemical and nutritional properties of starchy kiwifruit flour. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137627>
- Lares, M., & Pérez, E. (2006). Determination of the mineral fraction and rheological properties of microwave modified starch from canna edulis. *Plant Foods for Human Nutrition*, 61(3), 109–113. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0007-7>
- Leonel, M., Bolfarini, A. C. B., Rodrigues da Silva, M. J., Souza, J. M. A., & Leonel, S. (2020). Banana fruits with high content of resistant starch: Effect of genotypes and phosphorus fertilization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1020–1026. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.10.217>
- Leonel, M., Del Bem, M. S., dos Santos, T. P. R., & Franco, C. M. L. (2021). Preparation and properties of phosphate starches from tuberous roots. *International Journal of*

- Biological Macromolecules*, 183, 898–907.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.045>
- Leonel, M., Sarmiento, S., Cereda, M. P., & Guerreiro, L. (2002). Extração E Caracterização Do Amido De Starch Extraction and Characterization of. *Brazilian Journal of Food Technology*, 5(January), 23–32.
- Li, S., Ye, F., Zhou, Y., Lei, L., & Zhao, G. (2019). Rheological and textural insights into the blending of sweet potato and cassava starches: In hot and cooled pastes as well as in fresh and dried gels. *Food Hydrocolloids*, 89(August 2018), 901–911.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.041>
- Lobo Arias, M., Medina Cano, C. I., Grisales Arias, J. D., Yepes Agudelo, A. F., & Álvarez Guzmán, J. A. (2017). Caracterización y evaluación morfológicas de la colección colombiana de achira, *Canna edulis* Ker Gawl. (Cannaceae). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 47–73.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num1\\_art:558](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:558)
- Lourith, N., & Kanlayavattanukul, M. (2023). Sustainable approach to natural makeup cosmetics containing microencapsulated butterfly pea anthocyanins. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32(January), 101005.  
<https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101005>
- Maldonado, G., Romero, J. V., Mojica, S. L., Garnica, J. P., & Volverás, B. (2018). *EVALUACION AGRONOMICA DE SIETE CLONES DE ACHIRA PARA TRES SUBREGIONES PRODUCTORAS DE ALMIDON EN CUNDINAMARCA, HUILA Y NARIÑO, DURANTE EL PERIODO 2016-2017* (Vol. 2, Issue 6).  
<https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results%0Amuhammadkahfi16060474066@mhs.unesa.ac.id>
- Malki, M. K. S., Wijesinghe, J. A. A. C., Ratnayake, R. H. M. K., & Thilakarathna, G. C. (2023). Characterization of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch as a potential starch source for the food industry. *Heliyon*, 9(9), e20033.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20033>
- Medina, J. A., & Salas, J. C. (2008). Caracterización morfológica del granulo de almidón nativo: Apariencia, forma, tamaño y su distribución. *Revista de Ingeniería*, 27, 56–62. <https://doi.org/10.16924/revinge.27.6>
- Mendez, G., Velazquez, G., Fonseca, H. A., Morales, E., & Soler, A. (2022). Insights on the acid hydrolysis of achira (*Canna edulis*) starch: Crystalline and double-helical

- structure changes impacting functionality. *Lwt*, 153(September 2021), 112509.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112509>
- Mex, R., Garma, P., Bolivar, N., & Guillén, M. (2016). análisis-Proximal-y-Fitoquímico-de-Cinco-Varietades-de-Maíz-. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(2), 74–80. <https://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v12-n2-4-análisis-Proximal-y-Fitoquímico-de-Cinco-Varietades-de-Maíz-del-Estado-de-Campeche-%28México%29.pdf>
- Minagricultura. (2022). *Reporte: Área, producción y rendimiento nacional por cultivo*. Biblioteca Digital – Agronet. Estadísticas.  
<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Montes, E., Torres, R., Andrade, R., Pérez, O., Marimon, J., & Meza, I. (2009). Modelado de las isotermas de desorción del ñame (*Dioscorea rotundata*). *DYNA (Colombia)*, 76(157), 145–152.
- Montoya López, J., & Giraldo Giraldo, G. A. (2010). Caracterización Físico-Química De Harina De Trigo, Masa Y Pan. *Revista de Investigaciones Universidad Del Quindío*, 20(1), 29–35. <https://doi.org/10.33975/riuq.vol20n1.703>
- NTC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación. (2015). *Norma Técnica Colombiana, NTC 440:2015. Productos alimenticios. Métodos de ensayo*. (p. 6). ICONTEC. <https://doi.org/ICS:67.050>
- Obadi, M., Qi, Y., & Xu, B. (2023). High-amylose maize starch: Structure, properties, modifications and industrial applications. *Carbohydrate Polymers*, 299(October 2022), 120185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120185>
- OCDE/FAO. (2020). OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028. In *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://doi.org/10.4060/ca4076es>
- Ospitia Ferrer, N. A. (2019). *Determinación de la actividad desintegrante en tabletas, de almidones obtenidos de plantas nativas colombianas, modificados químicamente por carboximetilación: achira (Canna edulis) y arracacha (Arracacia xanthorrhiza)* [Universidad Nacional de Colombia].  
<http://bdigital.unal.edu.co/72854/2/NoraAlejandraOspitiaFerrer.2019.pdf>
- Otegbayo, B., Oguniyan, D., & Akinwumi, O. (2014). Physicochemical and functional characterization of yam starch for potential industrial applications. *Starch/Staerke*, 66(3–4), 235–250. <https://doi.org/10.1002/star.201300056>

- Pardo C, O. H., Castañeda, J. C., & Ortiz, C. A. (2013). Caracterización estructural y térmica de almidones provenientes de diferentes variedades de papa. *Acta Agronomica*, 62(4), 289–295.
- Pedrosa, M. T., Sampaio, U. M., & Schmiele, M. (2018). Identification and analysis of starch. In *Starches for Food Application: Chemical, Technological and Health Properties*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00002-2>
- Pérez-Santos, D. M., Velazquez, G., Canonico-Franco, M., Morales-Sanchez, E., Gaytan-Martínez, M., Yañez-Limon, J. M., & Herrera-Gomez, A. (2016). Modeling the limited degree of starch gelatinization. *Starch/Staerke*, 68(7–8), 727–733. <https://doi.org/10.1002/star.201500220>
- Perez, E., & Lares, M. (2005). Chemical Composition , Mineral Profile , and Functional Properties of Canna ( *Canna edulis* ) and Arrowroot ( *Maranta spp.* ) Starches. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60, 113–116. <https://doi.org/10.1007/s11130-005-6838-9>
- Pérez, E., & Lares, M. (2005). Chemical composition, mineral profile, and functional properties of Canna (*Canna edulis*) and Arrowroot (*Maranta spp.*) starches. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60(3), 113–116. <https://doi.org/10.1007/s11130-005-6838-9>
- Peroni, F. H. G., Rocha, T. S., & Franco, C. M. L. (2006). Some structural and physicochemical characteristics of tuber and root starches. *Food Science and Technology International*, 12(6), 505–513. <https://doi.org/10.1177/1082013206073045>
- Piyachomkwan, K., Chotineeranat, S., Kijkhunasatian, C., Tonwitawat, R., Prammanee, S., Oates, C. G., & Sriroth, K. (2002). Edible canna (*Canna edulis*) as a complementary starch source to cassava for the starch industry. *Industrial Crops and Products*, 16(1), 11–21. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(02\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(02)00003-1)
- Prieto Chacón, E. M. (2007). *Estudios de las transiciones térmicas del almidón y el almidón termoplástico mediante análisis térmicos (DSC y TGA)* (Issue 69). Universidad de los Andes.
- Priyan V, V., & Narayanasamy, S. (2022). Effective removal of pharmaceutical contaminants ibuprofen and sulfamethoxazole from water by Corn starch nanoparticles: An ecotoxicological assessment. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 94(September 2021), 103930. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103930>

- Przetaczek-Rożnowska, I., Fortuna, T., Wodniak, M., Łabanowska, M., Pająk, P., & Królikowska, K. (2019). Properties of potato starch treated with microwave radiation and enriched with mineral additives. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 229–234. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.153>
- Purwitasari, L., Wulanjati, M. P., Pranoto, Y., & Witasari, L. D. (2023). Characterization of porous starch from edible canna (*Canna edulis* Kerr.) produced by enzymatic hydrolysis using thermostable  $\alpha$ -amylase. *Food Chemistry Advances*, 2, 100152. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2022.100152>
- Radley, J. A. (1976). *Industrial uses of starch and its derivatives*. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-1329-1>
- Rahman, S. M. (2007). Handbook of Food Preservation. In *International Journal of Food Science & Technology*. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00462.x>
- Ramírez-Miranda, M., Cruz y Victoria, M. T., Vizcarra-Mendoza, M. G., & Anaya-Sosa, I. (2014). Determination of moisture sorption isotherms and their thermodynamics properties of nixtamalized maize flour. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(1), 165–178.
- Rockland, L. B., & Beuchat, L. R. (1987). *Water Activity: Theory and Applications to Food* (2nd ed.). Marcell Dekker.
- Rodríguez, D., Espitia, M., Caicedo, Y., & Baena, Y. (2005). Caracterización de algunas propiedades fisicoquímicas y farmacotécnicas del almidón de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*). *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 34(2), 140–146.
- Rodríguez, G. (2003). *Concepción de un modelo de agroindustria rural para la elaboración de harina y almidón a partir de raíces y tubérculos promisorios, con énfasis en los casos de achira (*Canna edulis*), arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) y ñame (*Dioscorea sp.*)*. CORPOICA. [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Concepción+de+un+modelo+de+agroindustria+rural+para+la+elaboración+de+harina+y+almidón+a+partir+de+raíces+y+tubérculos+promisorios+,+con+énfasis+en+los+casos+de+achira+\(+Canna+edulis+\),+arracac](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Concepción+de+un+modelo+de+agroindustria+rural+para+la+elaboración+de+harina+y+almidón+a+partir+de+raíces+y+tubérculos+promisorios+,+con+énfasis+en+los+casos+de+achira+(+Canna+edulis+),+arracac)
- Rodríguez, G., García, H., Camacho, J. H., & Arias, F. L. (2003). *El almidón de Achira o Sagú (*Canna Edulis*, Ker)* (Vol. 47, Issue 12, pp. 1086–1093). CORPOICA. <https://doi.org/10.1134/S106935131112007X>



- Rojas Rivera, M. A. (2012). *Estudios de las características fisiológicas de la yuca* (Vol. 1, Issue 1, p. 111).
- Rostamabadi, H., Rohit, T., Karaca, A. C., Nowacka, M., Colussi, R., Feksa Frasson, S., Aaliya, B., Valiyapeediyekkal Sunooj, K., & Falsafi, S. R. (2022). How non-thermal processing treatments affect physicochemical and structural attributes of tuber and root starches? *Trends in Food Science and Technology*, 128(July), 217–237. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.009>
- Saartrat, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., & Uttapap, D. (2005). Paste and gel properties of low-substituted acetylated canna starches. *Carbohydrate Polymers*, 61(2), 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.05.024>
- Salas Cuestas, S. Y. (2018). *Caracterización fisicoquímica y propiedades funcionales del almidón de arracacha (arracacia xanthorrhiza ) modificado por irradiación UV-C*. Universidad del Tolima.
- Salazar, D., Arancibia, M., Ocaña, I., Rodríguez-Maecker, R., Bedón, M., López-Caballero, M. E., & Montero, M. P. (2021). Characterization and technological potential of underutilized ancestral andean crop flours from ecuador. *Agronomy*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy11091693>
- Sánchez Rivera, M. M., & Bello Pérez, L. A. (2008). Efecto de la temperatura en la reacción de oxidación del almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.). Estimación de la energía de activación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(3), 275–281.
- Sanguino, D., & Salazar, Z. (2013). *Determinación De Actividad De Agua En Un Alimento*. 1, 1–4.
- Satin, M. (1998). Functional properties of starches. *AGSI Agriculture*, 1–9. <http://www.academia.edu/download/33271247/starches.pdf>
- Silveira Thys, R. C., Zapata Noreña, C. P., Ferreira Marczak, L. D., Gomes Aires, A., & Cladera-Olivera, F. (2010). Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. *Journal of Food Engineering*, 100(3), 468–473. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.033>
- Singh, N., Ogunseitan, O. A., Wong, M. H., & Tang, Y. (2022). Sustainable materials alternative to petrochemical plastics pollution: A review analysis. *Sustainable Horizons*, 2(April), 100016. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2022.100016>
- Singla, D., Singh, A., Dhull, S. B., Kumar, P., Malik, T., & Kumar, P. (2020). Taro starch: Isolation, morphology, modification and novel applications concern - A review.

- International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 1283–1290.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.093>
- Sun, X., Sun, Z., Saleh, A. S. M., Zhao, K., Ge, X., Shen, H., Zhang, Q., Yuan, L., Yu, X., & Li, W. (2021). Understanding the granule, growth ring, blocklets, crystalline and molecular structure of normal and waxy wheat A- and B- starch granules. *Food Hydrocolloids*, 121(April), 107034. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107034>
- Sundaram, B., Kumar, P., Suganthi, N., Kesika, P., & Chaiyasut, C. (2022). Pharmaceutical and biomedical applications of starch-based drug delivery system: A review. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 77(July), 103890. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103890>
- Takahashi, S., Maningat, C. C., & Seib, P. A. (1986). Acetylated and hydroxypropylated wheat starch: paste and gel properties compared with modified maize and tapioca starches.pdf. In *Cereal Chemistry* (Vol. 66, Issue 6, pp. 499–506).
- Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch - Composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>
- Thitipraphunkul, K., Uttapap, D., Piyachomkwan, K., & Takeda, Y. (2003a). A comparative study of edible canna (*Canna edulis*) starch from different cultivars. Part I: Chemical composition and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 53(3), 317–324. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00081-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00081-X)
- Thitipraphunkul, K., Uttapap, D., Piyachomkwan, K., & Takeda, Y. (2003b). A comparative study of edible canna (*Canna edulis*) starch from different cultivars. Part II. Molecular structure of amylose and amylopectin. *Carbohydrate Polymers*, 54(4), 489–498. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2003.08.003>
- Tien, C. (2019). Adsorption Equilibrium Relationships, Isotherm Expressions, Their Determinations, and Predictions. In *Introduction to Adsorption*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816446-4.00003-8>
- Timm, N. da S., Coradi, P. C., Lang, G. H., Ramos, A. H., Cañizares, L. da C. C., Ferreira, C. D., & de Oliveira, M. (2023). Effects of drying temperature of corn from the center and extremities of the corncob on morphology and technological, thermal, and pasting properties of isolated starch. *Journal of Food Engineering*, 336(June 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111215>
- Utrilla-Coello, R. G., Hernández-Jaimes, C., Carrillo-Navas, H., González, F., Rodríguez, E., Bello-Pérez, L. A., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2014). Acid

- hydrolysis of native corn starch: Morphology, crystallinity, rheological and thermal properties. *Carbohydrate Polymers*, 103(1), 596–602.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.046>
- Van Hung, P., & Morita, N. (2005). Physicochemical properties and enzymatic digestibility of starch from edible canna (*Canna edulis*) grown in Vietnam. *Carbohydrate Polymers*, 61(3), 314–321. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.04.021>
- Villa, C. C., Galus, S., Nowacka, M., Magri, A., Petriccione, M., & Gutiérrez, T. J. (2020). Molecular sieves for food applications: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 102(January), 102–122. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.027>
- Vilpoux, O. F., Brito, V. H., & Cereda, M. P. (2019). Starch Extracted From Corms , Roots , Rhizomes , and Tubers for Food Application. In *Solid Waste Landfilling*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00004-6>
- Vilpoux, O. F., & Santos Silveira Junior, J. F. (2023). Global production and use of starch. In *Starchy Crops Morphology, Extraction, Properties and Applications* (pp. 43–66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90058-4.00014-1>
- Wang, D., Zheng, X., Liu, W., Sun, Q., Chen, H. H., & Mu, H. (2023). Preparation and characterization of debranched starches: Influence of botanical source and debranching time. *Food Chemistry*, 407(December 2022), 135141.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135141>
- Wang, S., Zhang, P., Li, Y., Li, J., Li, X., Yang, J., Ji, M., Li, F., & Zhang, C. (2023). Recent advances and future challenges of the starch-based bio-composites for engineering applications. *Carbohydrate Polymers*, 307(January), 120627.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120627>
- Wang, Y., Wang, X., Hu, G., Al-Romaima, A., Liu, X., Bai, X., Li, J., Li, Z., & Qiu, M. (2022). Effect of green coffee oil as a natural active emulsifying agent on the properties of corn starch-based films. *Lwt*, 170(October), 114087.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114087>
- Watcharatewinkul, Y., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., & Uttapap, D. (2009). Pasting properties of a heat-moisture treated canna starch in relation to its structural characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 75(3), 505–511.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.08.018>
- Wu, C., Sun, R., Zhang, Q., & Zhong, G. (2020). Synthesis and characterization of citric acid esterified canna starch ( RS4 ) by semi-dry method using vacuum-microwave-

- infrared assistance. *Carbohydrate Polymers*, 250(June), 116985.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116985>
- Xiao, W., Shen, M., Ren, Y., Wen, H., Li, J., Rong, L., Liu, W., & Xie, J. (2022). Controlling the pasting, rheological, gel, and structural properties of corn starch by incorporation of debranched waxy corn starch. *Food Hydrocolloids*, 123(235), 107136. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107136>
- Xie, F., Ren, X., Wu, H., Zhang, H., Wu, Y., Song, Z., & Ai, L. (2022). Pectins of different resources influences cold storage properties of corn starch gels: Structure-property relationships. *Food Hydrocolloids*, 124(PA), 107287.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107287>
- Xie, F., Yuan, C., Zhang, H., Wu, Y., & Ai, L. (2023). Structure-function relationship between galactomannans and their effects on freeze-thaw stability, retrogradation, and texture of corn starch gels during cold storage. *Food Chemistry*, 398(August 2022), 133915. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133915>
- Yaruro Cáceres, N. C. (2018). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas, térmicas y microestructurales del almidón de Achira (*Canna edulis*) [Universidad Nacional de Colombia]. In *Universidad Nacional de Colombia Facultad*.  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69533/1143232250.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Yaruro Cáceres, N. C., Suarez Mahecha, H., de Francisco, A., Vásquez Mejía, S. M., & Diaz Moreno, C. (2021). Physicochemical, thermal, microstructural and paste properties comparison of four achira (*Canna edulis* sp.) starch ecotypes. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 25(June).  
<https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100380>
- Zamudio, P. B., Vargas, A., Gutiérrez, F., & Bello, L. A. (2010). Caracterización fisicoquímica de almidones doblemente modificados de plátano. *Agrociencia*, 44(3), 283–295.
- Zárate Polanco et al, L. (2014). Extracción y caracterización de almidón nativo de clones promisorios de papa criolla (*Solanum tuberosum*, Grupo Phureja). *Revista Latinoamericana de La Papa*, 18(1), 1–24. <https://doi.org/10.37066/ralap.v18i1.206>
- Zhang, C., Qiu, M., Wang, T., Luo, L., Xu, W., Wu, J., Zhao, F., Liu, K., Zhang, Y., & Wang, X. (2021). Preparation, structure characterization, and specific gut microbiota properties related to anti-hyperlipidemic action of type 3 resistant starch from *Canna edulis*. *Food Chemistry*, 351(11), 129340.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129340>
- Zhang, H., Jing, W. jiang, Xu, J. ju, Ma, B. ju, Wang, W. lu, Zhang, W. yang, Gu, J. fei, Liu, L. jun, Wang, Z. qin, & Yang, J. chang. (2020). Changes in starch quality of mid-season indica rice varieties in the lower reaches of the Yangtze River in last 80 years. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(12), 2983–2996.  
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63431-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63431-1)
- Zhang, J., Wang, Z., & Shi, X. (2010). Canna edulis Ker By-product : Chemical Composition and Characteristics of the Dietary Fiber. *Food Science and Technology International*, 16(4), 305–313. <https://doi.org/10.1177/1082013209353832>
- Zhang, J., Wang, Z. W., & Yang, J. A. (2010). Physicochemical properties of Canna edulis ker starch on heat-moisture treatment. *International Journal of Food Properties*, 13(6), 1266–1279. <https://doi.org/10.1080/10942910903061828>
- Zhang, J., Wang, Z. W., Yu, W. J., & Wu, J. H. (2011). Pectins from Canna edulis Ker residue and their physicochemical characterization. *Carbohydrate Polymers*, 83(1), 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.07.043>
- Zhao, T., Pan, X., Ou, Z., Li, Q., & Zhang, W. (2022). Comprehensive evaluation of waterlogging tolerance of eleven Canna cultivars at flowering stage. *Scientia Horticulturae*, 296(June 2021), 110890.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110890>
- Zhou, L., Chai, K., Yao, X., & Ji, H. (2021). Enhanced recovery of acetophenone and 1-phenylethanol from petrochemical effluent by highly porous starch-based hypercrosslinked polymers. *Chemical Engineering Journal*, 418(January), 129351.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129351>