

**UNIVERSIDAD DEL PAPALOPAN**  
**CAMPUS TUXTEPEC**

**T E S I S**

**Funcionalización de hotcakes con harina y  
almidón resistente tipo IV de plátano macho**  
**(*Musa paradisiaca*)**

Para obtener el título de:

**Ingeniera en Alimentos**

Presenta:

**Concepción Medina Cuevas**

Director de Tesis

**Dr. Lucio Abel Vázquez León**

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca. 2024



**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN  
CAMPUS TUXTEPEC**

---

**INGENIERIA EN ALIMENTOS**


**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**


En la ciudad de San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca, el día 12 de Febrero del 2024, los miembros de la comisión revisora de tesis designada por la jefatura de carrera de la licenciatura en Ingeniería en Alimentos decidieron examinar la tesis titulada “**Funcionalización de hotcakes con harina y almidón resistente tipo IV de plátano macho (*Musa paradisiaca*)**” presentada por la egresada C. Concepción Medina Cuevas, aspirante al título de Licenciatura.


Después de intercambiar opiniones, los miembros de la comisión manifestaron que la tesis **satisface** los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes, otorgando su **aprobación** para que la aspirante proceda con el proceso de titulación.

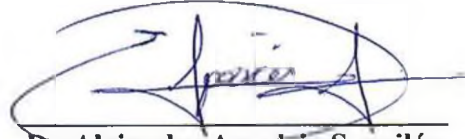
Tuxtepec, Oaxaca. A 12 de Febrero del 2024


Atentamente  
LA COMISIÓN REVISORA

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Miguel Ángel García Muñoz**  
Profesor Investigador  
Universidad del Papaloapan

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Delia Paramo Calderón**  
Profesora Investigadora  
Universidad del Papaloapan

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Cynthia Magaly Antonio Cisneros**  
Profesora Investigadora  
Universidad del Papaloapan

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alejandro Aparicio Saguilán**  
Profesor Investigador  
Universidad del Papaloapan

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Aurelio Ramírez Hernández**  
Profesor Investigador  
Universidad del Papaloapan



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN  
CAMPUS TUXTEPEC

INGENIERIA EN ALIMENTOS

Oficio No.	JC1A/001/2024
Asunto	Autorización de impresión de tesis

Tuxtepec, Oax. A 29 de Enero del 2024

**M. E. Yesenia Barrientos Arenal**  
Jefa de Servicios Escolares  
Universidad del Papaloapan  
Presente

Con base en el dictamen de la comisión revisora del trabajo de tesis titulado: “**Funcionalización de hotcakes con harina y almidón resistente tipo IV de plátano macho (*Musa paradisiaca*)**” de la egresada **C. Concepción Medina Cuevas**, se autoriza la impresión del trabajo de tesis para obtener el título de Licenciado en Ingeniería en Alimentos.

Por lo anterior y de acuerdo al reglamento institucional, se le da trámite legal para que proceda a la impresión del trabajo presentado.

El jurado del examen profesional esta compuesto por los siguientes profesores investigadores:

**Dr. Miguel Ángel García Muñoz** (Presidente, Universidad del Papaloapan)  
**Dra. Delia Páramo Calderón** (Secretario, Universidad del Papaloapan)  
**Dra. Cynthia Magaly Antonio Cisneros** (Vocal, Universidad del Papaloapan)  
**Dr. Alejandro Aparicio Saguilán** (Primer suplente, Universidad del Papaloapan)  
**Dr. Aurelio Ramírez Hernández** (Segundo suplente, Universidad del Papaloapan)

Sin más por el momento, le agradezco el apoyo. Reciba un saludo cordial.

Atentamente

*Terra uberrima, mens aperta*  
*Bou Lo-tama, chi jí jú*

Dra. Cynthia Magaly Antonio Cisneros  
Jefatura de carrera Ingeniería en Alimentos

Vo Bo Dra. Tania Zúñiga Martínez  
Encargada de Vicerectoria académica



VICE-RECTORIA  
ACADEMICA

ccp. Egresada, para su conocimiento  
ccp. Dr. Lucio Abel Vázquez León. Director de tesis, para su conocimiento  
ccp. Archivo

Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec. Circuito Central No. 200. Colonia Parque Industrial.  
Cp 68301, Tuxtepec, Oax. Tel 01287 8759240. [www.unpa.edu.mx](http://www.unpa.edu.mx)



INGENIERIA EN  
ALIMENTOS  
CAMPUS TUXTEPEC

El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado del trabajo y las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El autor otorga su consentimiento a la UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente.

## Dedicatoria

A Dios por la vida, por ser mi guía y acompañarme durante todo este proceso, darme fuerzas y bendiciones para alcanzar mis metas, por ser mi motivación para levantarme todas las mañanas a seguir esforzándome para cumplir cada una de ellas, gracias por estar presente en todo momento.

A mi madre, el pilar más importante en mi vida que me sostiene día a día, por todo lo que me ha dado a lo largo de mi carrera. Ella con su cariño y apoyo incondicional me impulso siempre a perseguir mis metas y a nunca desistir de ellas frente a las adversidades para poder lograr todos mis objetivos. Este proyecto no hubiera sido posible sin su apoyo incondicional. Te amo.

A mi hermana Lizbeth, por su apoyo absoluto, por guiarme y alentarme a seguir adelante, por procurar de mi como una madre y nunca dejarme sola en ninguna circunstancia. Te amo

A mi familia, mis hermanos, tíos, sobrinas, y mi abuelito, que son una pieza fundamental en mi vida. Por todos sus consejos, y ayudarme a nunca desfallecer de la meta, por enseñarme que no hay obstáculo que no pueda atravesar teniéndolos a ellos a mi lado, gracias por todo su apoyo.

A Fernanda, mi hermana pequeña por ser una de mis mayores confidentes, por su compañía, su amor y sus consejos. Te amo

A Ferchita, mi mejor amiga, gracias por su compañía en este largo proceso, por su amistad leal, por el apoyo y por animarme en todo momento que lo necesitaba.

A mi perrito chapulin, por acompañarme en esas largas noches de desvelo, por todo su amor y fiel compañía en el proceso.

## Reconocimientos

A mi padre Rogelio que en todo momento me brinda su completo apoyo para poder lograr mis objetivos. Te amo

Agradezco a mis amigas Rebeca, Lizeth Abigail, y Juana por todas esas anécdotas, llenas de diversión y distracción que tuvimos durante la universidad, mismos que me ayudaron a despejarme y a seguir adelante. Agradezco por el apoyo que me brindaron, por alentarme y animarme en los malos ratos, y sobre todo, por las risas que nunca faltaron.

A mi director de tesis, el Dr. Lucio Abel Vázquez León, por su paciencia, su dedicación y por brindarme los conocimientos necesarios que me ayudaron al desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Miguel Angel Garcia Muñoz, por el apoyo brindado desde el inicio de la carrera

A mis docentes, la Dra. Delia, Dra. Magaly, a los Dres. Andrés y Alejandro, por todos los conocimientos brindados en mi estancia en la universidad, por los momentos de convivencia y distracciones que hicieron amenos los malos ratos, Dios los bendiga. Gracias por todo.

# Contenido

<b>Dedicatoria</b> .....	<b>ii</b>
<b>Reconocimientos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Plátano macho (<i>Musa paradisiaca</i>)</b> .....	<b>2</b>
2.1.1 Descripción general .....	2
2.1.2 Producción agrícola .....	4
2.1.3 Propiedades nutritivas y funcionales .....	6
<b>2.2 Almidón</b> .....	<b>10</b>
2.2.1 Amilosa .....	11
2.2.2 Amilopectina .....	12
2.2.3 Propiedades funcionales del almidón .....	14
2.2.4 Digestibilidad del almidón .....	15
2.2.5 Clasificación nutricional del almidón .....	16
2.2.6 Clasificación del almidón resistente .....	17
2.2.7 Efecto del almidón resistente sobre el índice glucémico .....	19
2.2.8 Productos comerciales de almidón resistente .....	20
<b>2.3 Alimentos funcionales</b> .....	<b>22</b>
2.3.1 Origen y definición .....	22
2.3.2 Beneficios del desarrollo de alimentos funcionales .....	24
2.3.3 Alimentos funcionales basados en almidón de digestión lenta y resistente .....	28

2.3.4	Alimentos funcionales a partir de plátano comercialmente disponibles.....	29
<b>2.4</b>	<b>Alimentos funcionales realizados con almidon resistente: evaluación de propiedades reológicas .....</b>	<b>31</b>
2.4.1	Evaluación de cuatro tipos de almidón resistente en el desempeño de horneado de muffins y su relación con la reología de la masa .....	31
2.4.2	Almidón resistente: efecto sobre la reología, la calidad y el envejecimiento del pan de trigo blanco.....	33
<b>3</b>	<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>37</b>
4.1	Objetivo general .....	37
4.2	Objetivos específicos.....	37
<b>5</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
5.1	Metodología general .....	38
5.2	Material vegetal, materiales y químicos.....	39
5.3	Producción de la harina de plátano.....	39
5.4	Aislamiento del almidón de plátano .....	39
5.5	Producción de almidón resistente tipo IV.....	40
5.6	Producción de hotcakes.....	40
5.7	Análisis químico proximal.....	41
5.7.1	Humedad.....	41
5.7.2	Proteínas .....	41
5.7.3	Lípidos .....	42
5.7.4	Cenizas .....	42
5.8	Análisis reológicos.....	43
5.8.1	Perfil de viscosidad .....	43
5.8.2	Viscoelastacidad.....	43
5.9	Diseño experimental y análisis estadístico .....	43
<b>6</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>45</b>

6.1	Análisis químico proximal de harina de plátano macho, almidón nativo y almidón resistente tipo IV.....	45
6.2	Perfil de viscosidad de dispersiones acuosas de harina de plátano macho, almidón nativo y almidón resistente tipo IV .....	47
6.3	Propiedades viscoelásticas de pastas de hotcakes formuladas con harina de plátano verde y almidón resistente tipo IV .....	49
6.4	Análisis químico proximal de hotcakes enriquecidos con almidón resistente tipo IV...	53
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
	<b>PERSPECTIVAS.....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>

## Lista de Tablas

<b>Tabla 2.1</b>	Composición química del plátano macho inmaduro por cada 100 g de fruto fresco. ....	7
<b>Tabla 5.1</b>	Formulación para la preparación de pasta convencional para hotcakes .....	40
<b>Tabla 5.2</b>	Diseño experimental de mezcla simplex utilizado para la formulación de hotcakes funcionalizados con harina de plátano macho y almidón resistente tipo IV. ....	44
<b>Tabla 6.1</b>	Composición química proximal de harina de plátano macho, almidón nativo y almidón resistente tipo IV. ....	45
<b>Tabla 6.2</b>	Hotcakes desarrollados en el presente trabajo enriquecidos con harina de plátano verde y almidón resistente tipo IV. ....	55
<b>Tabla 6.3</b>	Composición química proximal de diferentes formulaciones de hotcakes desarrolladas en el presente trabajo. ....	57

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b> Planta de plátano macho ( <i>Musa parasidiaca</i> ).....	2
<b>Figura 2.2</b> Estados productores de plátano en México .....	5
<b>Figura 2.3</b> Estructura química de un segmento de la amilosa.....	11
<b>Figura 2.4</b> Estructura química de un segmento de la amilopectina.....	12
<b>Figura 2.5</b> Representación esquemática de las tres cadenas que conforman la molécula de amilopectina.....	13
<b>Figura 2.6</b> Alimentos funcionales disponibles comercialmente relacionados con el presente proyecto de investigación: harina para hotcakes con arroz integral y coco (a), harina de plátano para brownies (b) y harina de plátano verde y chícharo útil para horneados libres de gluten (c).....	30
<b>Figura 5.1</b> Metodología general del presente proyecto de investigación.....	38
<b>Figura 5.2</b> Gráfica de diseño experimental de mezclas simplex utilizado para la formulación de hotcakes funcionalizados con harina y almidón resistente tipo IV de plátano macho. ....	44
<b>Figura 6.1</b> Perfil de viscosidad de dispersiones acuosas (10% m/m) de harina de plátano macho verde (HPV), de almidón nativo de plátano macho (AN) y de almidón resistente tipo IV (AR). ....	48
<b>Figura 6.2</b> Barridos de frecuencia a 25 °C del módulo elástico $G'$ (a) y del módulo viscoso $G''$ (b) de pastas para hotcakes enriquecidas con harina de plátano macho verde (HPV) y almidón resistente tipo IV (AR).....	51
<b>Figura 6.3</b> $\tan \delta$ a 25 °C de pastas para hotcakes enriquecidas con harina de plátano macho verde (HPV) y almidón resistente tipo IV (AR).....	52
<b>Figura 6.4</b> Viscosidad compleja a 25 °C de pastas para hotcakes enriquecidas con harina de plátano macho verde (HPV) y almidón resistente tipo IV (AR) .....	53

## Resumen

Actualmente en México, y en otros países, durante el manejo postcosecha una fracción de los racimos de plátano variedad macho (*Musa paradisiaca*) no cumplen con los estándares de comercialización, y otros se desprenden antes de que alcance una maduración comercial. Esto genera del 20 al 30% de desechos agrícolas, por lo que resulta imprescindible buscar estrategias para dar valor agregado a esta fracción de la producción que aún posee atributos que garantizan un consumo seguro (frutos sanos, libres de plagas y contaminantes, perfil nutrimental completo). En la Cuenca del Papaloapan se comercializan frituras generadas a partir de esos plátanos machos que no se comercializan en estado fresco, pero existen otras alternativas, como la de realizar harina a partir de esos frutos. Dicha harina representa una importante fuente de almidón que actualmente se obtiene comercialmente de maíz y de papa, pero el de plátano macho reporta una fracción significativa de almidón resistente, el cual no eleva los niveles de glucosa en sangre al ser consumido, y presenta propiedades similares a la fibra dietética. En el presente trabajo de investigación se propuso el desarrollo de un alimento funcional a partir de hotcakes y considerando la adición de harina de plátano macho inmaduro y almidón resistente tipo IV. Esta propuesta surge como una estrategia de valorización del plátano macho y como atención a la demanda de alimentos saludables por parte de los consumidores. Entre las actividades se desarrollaron: (1) la caracterización de las propiedades proximales, y el perfil de viscosidad de las dispersiones acuosas de la harina de plátano macho, de su almidón nativo y del almidón resistente tipo IV desarrollado; (2) la evaluación del efecto de la adición de la harina de plátano macho y del almidón resistente tipo IV sobre las propiedades reológicas de las pastas para hotcakes; y (3) la caracterización proximal de los hotcakes desarrollados a partir de harina de plátano macho, y del almidón resistente tipo IV.

**Palabras clave:** Almidón resistente, panificación, alimentos funcionales.

## **ABSTRACT**

Currently in Mexico, and in other countries, during post-harvest handling, a fraction of male banana bunches (*Musa paradisiaca*) do not meet marketing standards, and others fall off before they reach commercial maturity. This generates 20-30% of agricultural waste, so it is essential to seek strategies to add value to this fraction of production that still has attributes that guarantee safe consumption (healthy fruit, free of pests and contaminants, complete nutritional profile). In the Papaloapan Basin, fried products made from these plantains that are not marketed fresh are marketed, but there are other alternatives, such as making flour from these fruits. Such flour represents an important source of starch that is currently obtained commercially from corn and potato, but plantain flour reports a significant fraction of resistant starch, which does not raise blood glucose levels when consumed, and presents properties similar to dietary fiber. In the present research work, the development of a functional food from hotcakes and considering the addition of immature plantain flour and type IV resistant starch was proposed. This proposal arises as a strategy for the valorization of plantain and as a response to consumer demand for healthy foods. Activities included: (1) the characterization of the proximal properties, and the viscosity profile of aqueous dispersions of plantain flour, its native starch and the type IV resistant starch developed; (2) the evaluation of the effect of the addition of plantain flour and type IV resistant starch on the rheological properties of hotcake batter; and (3) the proximal characterization of hotcakes developed from plantain flour, and type IV resistant starch.

**Key words:** Resistant starch, baking, functional foods.

# 1 INTRODUCCIÓN

El término de “hot cake” (palabra del inglés, traducción “panqué caliente”), aparece por primera vez en 1683 en Estados Unidos de América (Goldstein, 2015), desde entonces se ha trasladado y adoptado a diferentes culturas al estilo de cada lugar. En México es común consumir hot cakes en el desayuno o como cena y por lo regular, se acostumbra prepararlos a partir de harinas existentes en los centros comerciales, sin embargo a pesar de que está al alcance de comprarlas y su sencillez para prepararlos, sin dejar atrás lo delicioso, una de las grandes desventajas en el consumo del mexicano es el aporte calórico y glucémico en el abuso alimenticio y el gluten del trigo, además que la materia prima (harina de trigo) es refinada y no deja aprovechar las bondades del trigo. Otra de las principales desventajas, es que los hotcakes no son aptos para ser consumidos por algunos sectores de la población mexicana, esto debido a que su alto consumo se asocia al desarrollado de diversas enfermedades no transmisibles. Esto se justifica bajo la información estadística de los últimos años de que cada vez más mexicanos sufren diabetes mellitus y combatirla no depende sólo del factor biológico y médico, sino que se deben sumar variantes sociales determinantes como los hábitos alimenticios (Olivares, 2014). Estas enfermedades no transmisibles pudieran prevenirse principalmente con prácticas de alimentación buenas desde temprana edad y con productos saludables e innovadores.

Actualmente en México, principalmente en la región de San Juan Bautista Tuxtepec Oaxaca el plátano macho (*Musa paradisiaca*) es uno de los frutos de mayor cultivo por su gran importancia comercial. Es además un fruto rico en fibra soluble e insoluble, apropiado para poder integrarlo en un nuevo producto alimenticio, que pueda tener un mayor valor agregado y un efecto positivo en la salud del consumidor. Además, el plátano macho verde es un fruto con un alto contenido de almidón resistente, el cual ha sido reportado como prebiótico y con bajo índice glucémico, lo que lo hace favorable para el desarrollo de alimentos funcionales y de almidón resistente tipo IV.

En el presente trabajo de investigación se realizó la funcionalización de hot cakes a partir de harina de plátano macho inmaduro y con almidón resistente tipo IV desarrollado a partir del almidón nativo de plátano macho. Entre las variables analizadas se pueden citar los análisis químicos proximales, evaluación de las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas de la harina de plátano, del almidón tipo IV, el perfil reológico de las pastas para hot-cakes y la caracterización proximal del producto final.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Plátano macho (*Musa paradisiaca*)

El plátano macho (*Musa paradisiaca* AAB) (Figura 2.1) pertenece a la familia de las Musáceas, del género *Musa*, de la especie *Musa paradisiaca*. Tiene su origen en Asia meridional, siendo conocida en el Mediterráneo desde el año 650. La especie llegó a Canarias en el siglo XV y desde allí fue llevado a América en el año 1516. El cultivo comercial se inicia en Canarias a finales del siglo XIX y principios del siglo XX (Escobar, 1982).



**Figura 2.1** Planta de plátano macho (*Musa paradisiaca*). Fuente: [https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Cultivo\\_de\\_platano](https://www.anacafe.org/glifos/index.php/Cultivo_de_platano)

#### 2.1.1 Descripción general

El plátano es un alimento con un valor energético muy alto el cual es utilizado en la dieta de grandes grupos poblacionales dentro del continente americano. Puede ser consumido en distintos tipos de preparaciones siendo una de éstas en la elaboración de harinas instantáneas que en su mayoría son utilizadas en el desayuno, mientras que para el almuerzo o cena son utilizados en preparaciones más elaboradas como tostones entre otros (Guerrero Fernández, 2013).

El plátano es un alimento consumido en su mayoría porque presenta un agradable olor y sabor el cual gusta a todos. Debido a los porcentajes altos en azúcares naturales y en conjunto con la fibra conforma una gran fuente de energía. Es un alimento tropical de cáscara gruesa y pulpa carnosa, de tonalidad blanca y a veces ligeramente amarillenta, todas estas características se presentan en conjunto cuando el producto como tal está maduro. Su cultivo exige por lo general climas cálidos y una constante humedad en el aire, acompañado de temperaturas que varían entre los 26 y 27 grados acompañado de lluvias ligeramente prolongadas (Ayala, 2015).

El plátano representa el cuarto cultivo más grande a nivel mundial especialmente para los países latinoamericanos y del caribe puesto que es considerado como el principal cultivo especialmente en zonas húmedas y cálidas. La mayoría de los consumidores del norte suelen apreciarlo como un postre, pero en sí constituye a una parte esencial de la alimentación para los habitantes de países tropicales y subtropicales (Ayala, 2015). En México el término "plátano" se le denomina tanto a los bananos como a los plátanos; en otros países esta separación de nomenclatura se basa en la forma de consumirse, los bananos son los que se consumen como fruta cruda o fresco y los plátanos los que se consumen cocinados por la razón de que tienen más almidón (Vázquez *et al.*, 2005).

A continuación, se describen las características físicas del plátano (InfoAgro, 2015):

- ❖ **Planta:** Herbácea perenne gigante, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, cónico y de 3.5-7.5 m de altura, terminado en una corona de hojas.
- ❖ **Rizoma o bulbo:** tallo subterráneo con numerosos puntos de crecimiento (meristemas) que dan origen a pseudotallos, raíces y yemas vegetativas.
- ❖ **Raíz:** Son de color blanco, tiernas cuando emergen y amarillentas y duras posteriormente. Su diámetro oscila entre 5 y 8 mm y su longitud puede alcanzar los 2.5-3.0 m en crecimiento lateral y hasta 1.5 m en profundidad.
- ❖ **Tallo:** el verdadero tallo es un rizoma grande, almidonoso, subterráneo, que está coronado con yemas, las cuales se desarrollan una vez que la planta ha florecido y fructificado.
- ❖ **Hojas:** Son hojas grandes, verdes y dispuestas en forma de espiral, de 2-4 m de largo y hasta 1.5 m de ancho, con un peciolo de 1 m o más de longitud y un limbo

elíptico alargado, ligeramente decurrente hacia el peciolo, un poco ondulado y glabro.

- ❖ Flores: flores amarillentas, irregulares y con seis estambres, de los cuales uno es estéril, reducido a estaminodio petaloideo.
- ❖ Fruto: baya oblonga. Durante el desarrollo del fruto éstos se doblan geotrópicamente, según el peso de este, determinando esta reacción la forma del racimo (InfoAgro, 2015).

### 2.1.2 Producción agrícola

El plátano (término general en varios ámbitos) representa uno de los cultivos más importantes del mundo, ocupa el cuarto lugar después del arroz, el trigo y maíz. Dentro de los 11 principales países productores de plátano macho (con el 83% del total), destaca Uganda, así como otros países de Sudamérica (Colombia y Perú), de Centroamérica y el Caribe (Ecuador y Cuba), y de África (Ruanda, Ghana, Nigeria, Costa de Marfil, Camerún y Congo). La tasa media de crecimiento anual de la producción de plátano macho para la mayoría de los países productores es positiva, con niveles muy favorables (cerca o superiores al 5%), para países como Cuba, Ruanda y Ghana, y entre el 1.5 al 2.6% para naciones como Colombia, Nigeria y Uganda. México el 12 productor mundial del fruto. El 30 por ciento de esa producción se destina a 43 mercados principalmente a Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Corea del Sur, Italia y Nueva Zelanda. El valor de las exportaciones al cierre de 2020 se ubicó en 274 millones de dólares.

El plátano es uno de los cultivos más importantes en la agricultura mexicana y ocupa el segundo lugar de la producción en frutas tropicales porque es básico en la alimentación: su precio es bajo, de sabor agradable, está disponible todo el año, puede utilizarse en combinaciones múltiples para la preparación de alimentos, genera sensación de saciedad, su valor nutritivo es alto y aporta potasio, hierro y vitamina K. Actualmente es una de las frutas más adquiridas en el país; el consumo per cápita promedio es de 14.4 kilos al año tiene una participación en la producción nacional de frutos de 10.1%. La producción de plátano macho en México es una de las más importantes en términos globales. Los cinco principales estados productores son Chiapas, Tabasco, Veracruz, Jalisco y Oaxaca, con una producción estimada en dos millones 45 mil toneladas en 2020 (Figura 2.2).



**Figura 2.2** Estados productores de plátano en México (SIAP, 2020).

La superficie sembrada de plátano para el estado de Oaxaca es de 3,362.82 hectáreas distribuidas en Río Grande, Villa de Tututepec; en Santa María Huatulco, Puerto Escondido, de San Pedro Mixtepec; así como Valle Nacional, Santa María Jacatepec, San José Chiltepec y Tuxtepec, en la Cuenca; con una producción valorada de 69,380 toneladas; siendo el único distrito de Tuxtepec en producir la variedad macho (SIAP-SAGARPA, 2020). La superficie sembrada estimada para el distrito de Tuxtepec es de 1,626.00 hectáreas siendo el municipio de San Juan Bautista Tuxtepec en tener la mayor producción valorada en 34,916.71 toneladas según SIAP-SAGARPA (2020).

Sin embargo, no toda esta producción es aprovechada. Existen épocas del año en donde hay sobreproducción y las pérdidas postcosecha se incrementan. O como en 2018, cuando el impacto de las tormentas e inundaciones dejó afectaciones incalculables en el sector productivo del plátano macho en la región de la Cuenca del Papaloapan. Las intensas lluvias y vientos fueron motivo para declarar hasta 90% de los cultivos de la región como zonas siniestradas, principalmente en la comunidad de Santa Teresa, en Tuxtepec, advirtió el presidente del Sistema Producto Plátano en Oaxaca, Melesio Torres Cortes, ([oaxaca.eluniversal.com.mx/especiales/28-06-2018/pese-las-perdidas-en-la-cuenca-no-dejan-cultivo-de-platano](http://oaxaca.eluniversal.com.mx/especiales/28-06-2018/pese-las-perdidas-en-la-cuenca-no-dejan-cultivo-de-platano); 2018).

Además, las pérdidas de cultivos por distintas enfermedades o plagas también ha golpeado la Cuenca del Papaloapan desde hace ocho años, el sector productor de la región argumenta que no han tenido la capacidad económica para solventar este problema. Pese

a estas circunstancias, en las que enfrentan pérdidas, el número de productores en la región no ha disminuido desde hace más de una década. Por estas razones es indispensable generar alternativas de aprovechamiento o transformación de esta materia prima económicamente importante para la región.

### **2.1.3 Propiedades nutritivas y funcionales**

El principal subproducto del proceso industrial del plátano es la cáscara, la cual representa aproximadamente el 30% del peso del fruto; las aplicaciones potenciales para la cáscara de plátano dependen de su composición química. La cáscara es rica en fibra dietética, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y potasio; entre los esfuerzos para utilizar la cáscara se han obtenido proteínas, metanol, etanol, pectinas y enzimas. Entre otros usos se ha obtenido carbón vegetal, una fuente de combustible alternativa para cocinar.

Pero la parte más explotada de la platanera es la pulpa, que representa el 70% en peso del fruto, y que contiene diversas propiedades. De manera general, la pulpa de plátano fresco es rico en vitaminas A, B6, C y D (Tabla 2.2), dando beneficios especialmente a los huesos y músculos del cuerpo humano, ya que uno sólo de estos frutos contiene el 41% del requerimiento necesario de vitamina B6 al día, estudios recientes han comprobado que el consumo de plátano ayuda a mejorar el humor para personas con depresión y síndrome pre-menstrual debido a su alto contenido de vitaminas, específicamente la vitamina B6 ya que está integrada por las moléculas de piridoxal, piridoxina y piridoxamina las cuáles tienen un papel atenuante en el metabolismo de varios neurotransmisores (serotonina, norepinefrina, sistema colinérgico, dopamina y ácido  $\gamma$ -aminobutírico) cuya deficiencia permite el desarrollo de la depresión así como el síndrome premenstrual y el trastorno disfórico premenstrual (Bello-Pérez, 1999). Además, es una excelente fuente de potasio. El potasio se puede encontrar en una variedad de frutas, verduras o incluso carnes, sin embargo, un solo plátano puede proporcionar hasta el 23% de potasio que se necesita al día. El potasio beneficia a los músculos, ya que ayuda a mantener su buen funcionamiento y evita los espasmos musculares; también puede ayudar a disminuir la presión arterial y reduce el riesgo de accidentes cerebrovasculares.

En estado inmaduro, la pulpa de plátano posee una baja concentración de lípidos y proteínas, pero una alta concentración de carbohidratos (Tabla 2.1), de los cuales alrededor

del 70% en base seca es almidón. Este almidón se degrada a una pequeña porción de monosacáridos mientras que el resto del almidón se degrada a sacarosa. El almidón es un polímero importante de origen natural con diversas aplicaciones en la ciencia de los alimentos y polímeros (espesante, formador de biopelícula, retenedor de agua, etc.), de hecho, la industria moderna de alimentos está aumentando la demanda del mismo por lo que se ha generado un interés por identificar nuevas fuentes de este polisacárido (Bello-Pérez, 1999).

**Tabla 2.1** Composición química del plátano macho inmaduro por cada 100 g de fruto fresco.

<b>Nutrientes</b>	<b>Plátano macho (g)</b>	<b>Plátano (banana)</b>
<b>Agua</b>	65.3	74.2
<b>Grasa</b>	0.00037	0.00048
<b>Proteína</b>	1.3	1.03
<b>Hidratos de carbono</b>	30.89	23.0
<b>Fibra</b>	2.3	2.4
<b>Potasio</b>	0.499	0.396
<b>Fosforo</b>	0.034	0.02
<b>Hierro</b>	0.0006	0.00031
<b>Sodio</b>	0.004	0.001
<b>Magnesio</b>	0.037	0.029
<b>Calcio</b>	0.003	0.006
<b>Zinc</b>	0.00014	0.00016
<b>Vitamina C</b>	0.0184	0.0091
<b>Vitamina A</b>	0.001127	0.0081

Fuente: <https://www.botanical-online.com/alimentos/platano-macho-composicion-nutricional>

#### Producción de harina de plátano

Se denomina harina al producto final que se obtiene mediante la molienda de cereales molidos, pseudocereales, leguminosas, tubérculos, raíces, dando como resultado final un polvo de textura muy fina que puede almacenarse de forma segura durante varios meses

debido a su baja actividad de agua. En la actualidad existen distintos tipos de harinas como las enriquecidas que son aquellas que han sido adicionadas después de la molienda con algún producto con el cual aumentará su valor nutricional como vitaminas o minerales; por su parte las harinas integrales son todas aquellas que conservan casi en su totalidad sus niveles de fibra los cuales no han sido adulterados bajo ningún producto (Bueno, 2013).

La harina de plátano es un producto 100% de origen natural la cual es de color blanco parduzco, de fácil digestión, susceptible a la humedad y de fácil cocción. La harina de plátano es una de las harinas más equilibradas debido al gran aporte de nutrientes a nuestro organismo ya que conserva todos los grupos de vitaminas y nutrientes que la pulpa contiene en estado fresco: es rica en hidratos de carbono, sales minerales, y múltiples vitaminas, que ya se han citado. Por lo que la convierte en un producto totalmente remineralizante y energético (Montenegro, 2015). Su intenso uso ha llevado al desarrollo de métodos de secado que permiten contar con plátano todo el año; tecnologías como el secado al sol o el secado en hornos, ya sea troceados o molidos, proporcionan una harina excelente, que se utiliza sola o mezclada con harina de trigo, de maíz o de yuca para la elaboración de masas o productos de panificación (Happi-Emaga *et al.*, 2007).

Según estudios datan que la harina de plátano tiene excelentes propiedades beneficiosas para el tratamiento de ciertas enfermedades como anorexia crónica, deshidratación, ayuda a eliminar problemas musculares (Collaguazo, 2013). Además de esto también contiene una cantidad significativa de almidón (20%) y de fibra dietética (15%), componentes esenciales con importantes propiedades funcionales, como son: reducción del índice glucémico e insulinémico en la sangre, protección frente a todo tipo de cáncer sobre todo el cáncer de colon (Canarias, 2013).

Otra de sus propiedades nutricionales debido a ser una harina rica en fibra es que ayuda a prevenir problemas de estreñimiento y ayuda a contribuir una mejoría total en el metabolismo, ayudando a pacientes celíacos debido a que posee escasos niveles de gluten y almidones (Rodríguez, 2016).

El uso de plátano para la obtención de harina ha surgido a consecuencia de estos hallazgos asociados a su composición química, especialmente por su contenido de almidón resistente, y por la necesidad de aprovechar los excedentes del campo. De hecho, la harina de plátano macho verde es una línea de investigación activa desde 1986, año en que

Englyst y Cummings reportaron 37% de almidón en plátanos inmaduros, en contraste con el 3% en los más maduros.

García-Suárez (2001), elaboró harina precocida con plátano macho verde con aplicaciones potenciales para preparar alimentos para bebé, galletas, panes, pastas y bebidas refrescantes; además de utilizarse como materia prima para producir jarabe de glucosa y fibra, y de ese modo diversificar el consumo del fruto para contribuir a mejorar la calidad nutricional de la población mexicana. Concluyó que una fracción de su almidón es resistente, es decir, no se degrada por las enzimas digestivas y en conjunto con la fibra soluble del fruto, contribuye a bajar los niveles de colesterol y glucosa en la sangre, previniendo así el riesgo de diabetes y enfermedades cardiovasculares, además de mejorar el tránsito intestinal y reducir el riesgo de enfermedades del colon.

En 2006, Juárez-García *et al.*, determinaron la composición química de la harina de plátano macho verde (*Musa paradisiaca* L.), reportando como componentes mayoritarios a la fibra dietética (14.52%) y al almidón total (73.36%), del cual 17.50% es almidón resistente, cuya fermentación por las bacterias colónicas supone efectos benéficos en la salud (Ovando, 2008). La harina de plátano es descrita por Ovando (2008), como un polvo fino, blanco, que se oscurece con el paso del tiempo. Esta autora también describe la obtención de harina, utilizando plátanos machos inmaduros. En primer lugar, los plátanos son pelados y cortados en rodajas de 1 cm y vertidos de inmediato en una solución de ácido cítrico (3 g/L); posteriormente, se colocan las rodajas en mallas y se someten a un proceso de secado, a  $50\pm 1^{\circ}\text{C}$  durante 24 h. Finalmente, las rodajas deshidratadas son molidas y el polvo obtenido es tamizado en malla (abertura: 0.038 mm).

Por su parte, Juárez-García *et al.* (2006) evaluaron la composición y digestibilidad de pan elaborado a partir de 100% de harina de plátano, comparado con pan con 100% harina de trigo. Estos autores determinaron que la harina de plátano tiene alto contenido de almidón resistente y fibra, concluyendo que la harina de plátano es un ingrediente potencial en la elaboración de productos con carbohidratos de bajo índice glucémico.

Por otro lado, Agama-Acevedo *et al.* (2009) prepararon diferentes mezclas de harina de plátano y semolina (harina de plátano al 15%, 30% y 45%, tomando como testigo, semolina al 100%), para la elaboración de espagueti. El contenido de almidón total fue mayor al 45%, presentando menor contenido de almidón disponible; además, se observó que el contenido de almidón resistente y la fracción no digerible aumentaba en relación con la cantidad de

harina de plátano añadida. Adicionalmente, estos investigadores mostraron que la dureza y elasticidad del espagueti no fueron afectadas por la adición de harina de plátano, pero la adhesividad y masticabilidad se incrementaron conforme aumentaba el porcentaje de harina de plátano en la mezcla. Además, los distintos espaguetis preparados no mostraron diferencias de preferencia entre los consumidores (Agama-Acevedo *et al.*, 2009).

En otro estudio, Aparicio-Saguilán *et al.*, (2013) elaboraron tortillas de maíz adicionadas con harinas de plátano macho y yuca. Evaluaron la composición química y digestibilidad del almidón en estos productos y observaron que en las tortillas elaboradas con harina de maíz y harina de plátano (60:40), el contenido de fibra y proteínas disminuyó respecto al testigo (maíz 100%). Concluyeron que el cambio en la composición química y digestibilidad del almidón de las tortillas elaboradas con harinas de fuentes no convencionales (harina de plátano), podría ser una alternativa para la población con requerimientos dietéticos especiales.

Por otra parte, la harina de plátano macho puede ser una fuente de compuestos antioxidantes como polifenoles (Bello *et al.*, 2012). En la actualidad, los países industrializados están buscando ingredientes funcionales para ser adicionados a los alimentos, los cuales, al ser consumidos, promuevan el estado saludable del organismo; como contenidos altos de almidón resistente (AR), fibra y actividad antioxidante (Tribess *et al.*, 2009). Por lo tanto, la harina de plátano macho verde es un producto importante de considerar para ser industrializado en el Distrito de Tuxtepec (Oaxaca), con el fin de utilizarse para desarrollar nuevos productos para consumo humano, que además de saciar y nutrir aporten un beneficio a la salud. De hecho, como se ha discutido, algunos estudios han demostrado que el consumo de plátano inmaduro podría tener efectos benéficos en la salud de los consumidores debido a los componentes indigeribles que presenta, como el almidón resistente (Faisant *et al.*, 1995). A continuación, se describen algunas propiedades del almidón para comprender sus efectos benéficos como almidón resistente.

## **2.2 Almidón**

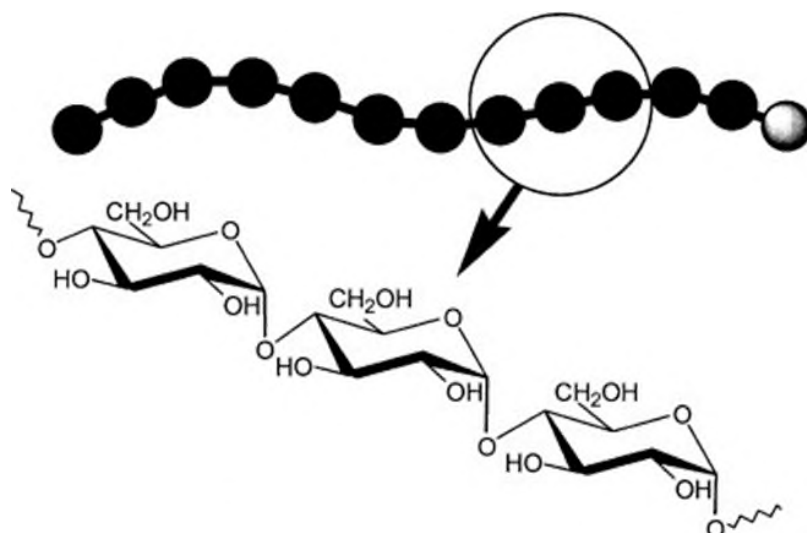
El almidón es un carbohidrato complejo compuesto por unidades de glucosa, constituido por amilosa y amilopectina (López-Rubio *et al.*, 2007, Witczak *et al.*, 2016), cuya proporción confiere diferentes características de comportamiento y varía de acuerdo con la fuente de

obtención del almidón (Cubero *et al.*, 2002). Su estructura es la de un homopolisacárido de moléculas de D-anhidroglucosa unidas mediante enlace  $\alpha$  (1,4) y  $\alpha$  (1,6).

El almidón constituye una excelente materia prima para modificar la textura y consistencia de los alimentos por sus propiedades espesantes y gelificantes. Su funcionalidad depende del peso molecular de la amilosa y la amilopectina, así como de la organización molecular de estos glucanos dentro del gránulo (Bello-Pérez *et al.*, 2002).

### 2.2.1 Amilosa

La amilosa (Figura 2.3) es un polisacárido principalmente lineal, conformado por unidades de D- glucopiranososa unidas por enlaces  $\alpha$ -(1-4); también se ha demostrado la presencia de pocas ramificaciones unidas a través de enlaces  $\alpha$ -(1-6); sin embargo, estas ramificaciones son muy escasas y esparcidas, aproximadamente entre cada 180 a 400 unidades de glucosa. Este polisacárido presenta una masa molar de entre 105 a 106 Dalton (Da), con un intervalo de 500 a 6000 unidades de D-glucosa (Collado & Corke, 2003; Knill & Kennedy, 2004; Espinosa, 2008; Vázquez, 2013).



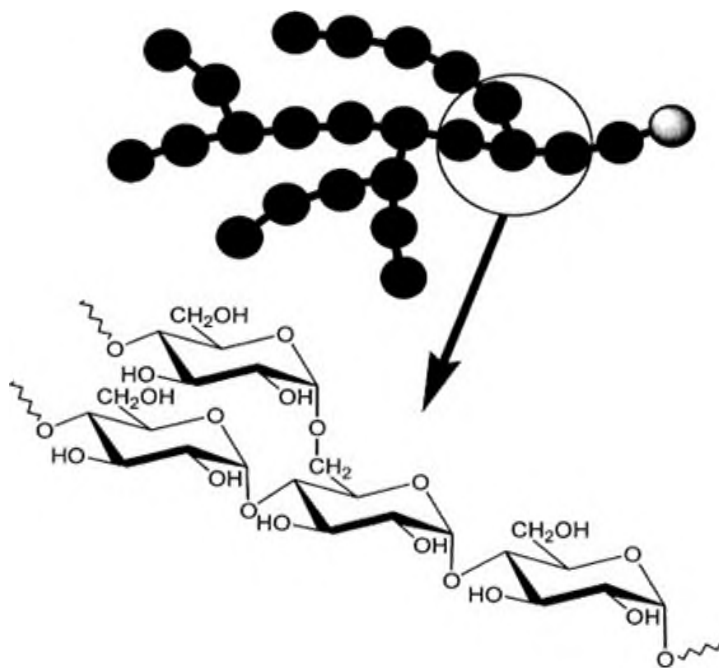
**Figura 2.3** Estructura química de un segmento de la amilosa (Tomado de Knill y Kennedy, 2004).

Con una estructura química lineal, la amilosa tiene la capacidad de cambiar su conformación. A pesar de ser una molécula insoluble en agua, por su alto contenido de grupos hidroxilo, puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas

vecinas por puentes de hidrógeno y generar una estructura helicoidal en soluciones neutras, la cual presenta de seis a ocho unidades de glucosa por vuelta, y formar una doble hélice cuando diferentes hélices se empaquetan juntas. Las dos cadenas de la doble hélice se pueden organizar en cualquier orientación paralela o antiparalela (Jane, 2003; Espinosa, 2008; Hernández-Medina *et al.*, 2008).

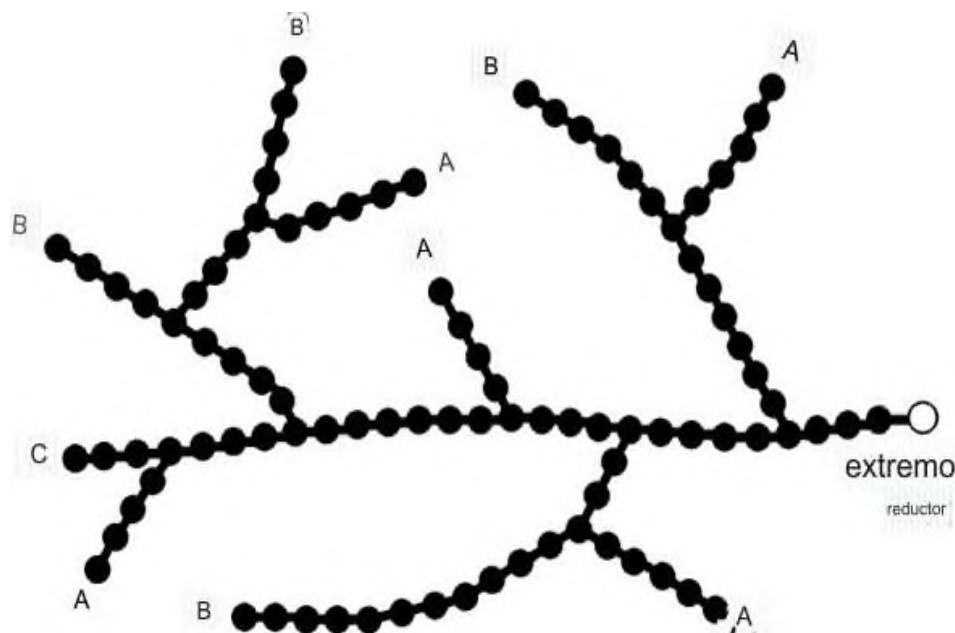
### 2.2.2 Amilopectina

La amilopectina (Figura 2.4) es un polisacárido altamente ramificado, conformado por unidades de  $\alpha$ -D- glucopiranosas unidas en un 94-96% por enlaces  $\alpha$  (1-4) y en un 4-6% con uniones  $\alpha$  (1-6), las cuales generan las ramificaciones. Dichas ramificaciones se localizan aproximadamente entre cada 15 a 25 unidades de glucosa, la cual varía no sólo por el origen botánico del almidón sino también por su conformación estructural (Collado & Corke, 2003; Knill & Kennedy, 2004; Espinosa, 2008; Hernández- Medina *et al.*, 2008; Vázquez, 2013).



**Figura 2.4** Estructura química de un segmento de la amilopectina (Tomado de Knill y Kennedy, 2004).

La amilopectina es parcialmente soluble en agua caliente. Es el componente mayoritario del almidón, con un peso molecular que varía entre  $1 \times 10^6$  a  $1 \times 10^8$  Da. Esta molécula presenta tres tipos de cadenas, clasificadas como cadena A, B y C (Knill & Kennedy, 2004; Vázquez, 2013), como se observa en la Figura 2.5.



**Figura 2.5** Representación esquemática de las tres cadenas que conforman la molécula de amilopectina (Tomado de Knill y Kennedy, 2004).

La cadena A presenta un grado de polimerización de 14 a 20 unidades glucosídicas, organizadas en una estructura en forma de racimo y responsables de la región cristalina dentro del gránulo. Estas cadenas están unidas a la molécula sólo a través de su extremo reductor potencial (Vázquez, 2013).

La cadena B son cadenas largas e internas con un grado de polimerización de 35 a 45 unidades glucosídicas, son responsables de formar la columna de la amilopectina y se extienden sobre dos o más racimos, donde cada racimo contiene de dos a cuatro cadenas A estrechamente asociadas (Vázquez, 2013).

La cadena C es una sola cadena con un grado de polimerización mayor a 60 unidades glucosídicas que posee un extremo reductor (Knill & Kennedy, 2004; Vázquez, 2013).

Los almidones nativos de las diferentes especies de vegetales tienen como característica fundamental que sus propiedades fisicoquímicas y funcionales están influenciadas por la proporción de amilosa y amilopectina y su organización molecular dentro del gránulo de almidón. Por lo que el tamaño, la distribución y forma del gránulo es correlacionado con algunas de las propiedades funcionales. Estas propiedades también están influenciadas por factores genéticos de las plantas y por factores como la edad de la planta, la época de cosecha, la fertilidad del suelo y la precipitación, entre otros (Salinas-Moreno *et al.*, 2003; Hernández-Medina *et al.*, 2008; Acuña, 2012; Wang *et al.*, 2014).

### **2.2.3 Propiedades funcionales del almidón**

Las propiedades funcionales más importantes que considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y nutrición humana son la: gelatinización, índice de solubilidad, capacidad de hinchamiento, absorción de agua, sinéresis/retrogradación, comportamiento reológico de sus pastas y geles, capacidad emulsificante, análisis granulométrico y digestibilidad enzimática (Hernández-Medina *et al.*, 2008; López, 2011; Wang *et al.*, 2014). El almidón es un importante hidrato de carbono que se utiliza en una serie de aplicaciones industriales, por lo que posee una importancia económica considerable.

En general, el almidón tiene un buen potencial como ingrediente funcional debido a su fino tamaño de partícula, apariencia blanca y sabor suave que aplica a las propiedades tecnológicas de muchos alimentos. En este sentido, el almidón es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales como un espesante, estabilizador coloidal y agente gelificante. Debido a su gran solubilidad y capacidad de absorción de agua, se emplea para mejorar las características reológicas de salsas, disminuyendo la aglomeración, mejorando la viscosidad, consistencia, estabilidad y textura de productos semi viscosos. Tales propiedades, junto a su compatibilidad con diversos ingredientes y su bajo costo, han llevado a que el almidón se incorpore con éxito en muchos productos alimenticios, industriales y farmacéuticos.

En la industria, el almidón mejora la estabilidad de los alimentos durante el almacenamiento refrigerado, así como en los procesos de congelación/descongelación, por lo tanto, es usado con frecuencia en la industria de las cecinas. Además, el almidón funciona como agente de moldeo ya que tiene la propiedad de formar películas resistentes y lisas. Esta

propiedad es aprovechada para dar acabado de superficies en diferentes tipos de industrias.

Por otro lado, el almidón tiene la propiedad de mantenerse estable a un pH menor de 4,5, por lo que puede ser usado en productos ácidos como el yogurt, vinagretas entre otros. Este tipo de almidones también se puede usar en una amplia gama de productos horneados, productos de repostería, yogurt, salsas, bebidas, embutidos y alimentos fermentados.

Una característica del almidón es la capacidad para emplearse como agente viscosante, cuya finalidad es mejorar y mantener las características deseables de textura, consistencia, aspecto y cuerpo. En productos lácteos como el yogurt, la sustitución del 3% de sólidos lácteos con suspensiones de almidón calentadas, cortadas y microfluidizadas aumenta la viscosidad y disminuye la sinéresis de los yogures.

#### **2.2.4 Digestibilidad del almidón**

La digestión de los almidones comienza tan pronto como el producto alimenticio ingresa a la cavidad bucal, donde el acto de masticar descompone los trozos de alimento en partículas más pequeñas. Estas partículas tienen una mayor proporción de área de superficie a volumen, lo que permite una capa eficaz y penetrante de saliva, secretada por las glándulas salivales en respuesta a la masticación. La saliva (pH 6.8), aunque en su mayor parte es agua, es aproximadamente 1% una combinación de electrolitos y enzimas. Una de estas enzimas es una proteína digestiva conocida como  $\alpha$ -amilasa, que inicia la hidrólisis del almidón al escindir aleatoriamente los enlaces  $\alpha$  (1-4) que se encuentran en el almidón. Una vez que la comida es lo suficientemente pequeña y está suficientemente cubierta de saliva, se ingiere y pasa al estómago a través de la faringe y el esófago (Samarakoon, 2020).

Este entorno de pH bajo desactiva la  $\alpha$ -amilasa introducida en la boca y, como tal, no se produce una mayor digestión de carbohidratos en el estómago. Se introducen otras enzimas digestivas, incluidas las proteasas y las lipasas, que inician la degradación de proteínas y lípidos.

Desde el estómago, esta mezcla de ácido, enzimas y comida parcialmente digerida (conocida como quimo) ingresa a la primera sección del intestino delgado llamada duodeno.

Aquí, las secreciones del páncreas y la vesícula biliar elevan el pH hasta aproximadamente 7.8, lo que permite que se introduzca más  $\alpha$ -amilasa desde las paredes de las células epiteliales que recubren el intestino delgado. Por lo tanto, la descomposición (hidrólisis) del almidón continúa en el intestino delgado creando cadenas de carbohidratos cada vez más cortas con longitudes variables hasta que se alcanzan la maltosa o las dextrinas. La  $\alpha$ -amilasa no puede romper los enlaces  $\alpha$  (1-4) si están cerca o adyacentes a enlaces ya escindidos, de ahí el requisito de la enzima adicional, maltasa. Una vez que se produce la glucosa, el monosacárido se absorbe a través de la pared del intestino delgado hacia el torrente sanguíneo a través de una serie de vías complejas (Samarakoon, 2020).

El grado y la velocidad de la digestión de los carbohidratos en el cuerpo humano dependen en gran medida de la longitud de la cadena a medida que se ingieren. Los carbohidratos estructurados pequeños como la maltosa, la glucosa y la fructosa, a menudo presentes en alimentos dulces como los dulces y las frutas, se digieren y absorben con relativa rapidez, ya que se requiere poca o ninguna digestión enzimática. Por otro lado, los carbohidratos más grandes y complejos, como los oligosacáridos y el almidón, pueden tardar mucho más en digerirse; según esta información, los almidones se pueden clasificar en tres formas principales según su tasa de digestibilidad, como se discute en la sección siguiente (Samarakoon, 2020).

### **2.2.5 Clasificación nutricional del almidón**

En la última década, se ha demostrado la invalidez de dos suposiciones acerca de la digestión del almidón, la primera, al estar el almidón formado por polímeros complejos, su hidrólisis y absorción es más lenta que azúcares simples o disacáridos. Gran cantidad de estudios *in vitro* e *in vivo* han mostrado que la presentación física de los componentes de los alimentos es el mayor determinante de la tasa de digestión de ambos, almidones y azúcares. La segunda suposición es que el almidón es completamente hidrolizado y absorbido dentro del intestino delgado, se ha confirmado que la cantidad digerida es variable, ya que una cantidad significativa de almidón, dependiendo de nuevo de la presentación física, se escapa de la digestión en el intestino delgado y entra al colon (Englyst *et al.*, 1992).

Las propiedades nutricionales del almidón en las comidas dependen de su biodisponibilidad en la digestión y/o absorción en el tracto gastrointestinal (Björck *et al.*, 1994). Desde este

punto de vista Englyst y Hudson (1996) proponen la siguiente clasificación nutricional del almidón: almidón rápidamente digerible (ARDIG), almidón lentamente digerible (ALDIG) y almidón resistente (AR) (Sajilata *et al.*, 2006).

- *Almidón rápidamente digerible (ARDIG)*: Se refiere al almidón hidrolizado y absorbido en el intestino delgado, principalmente es almidón amorfo y/o disperso, los cuales tienen una respuesta glicémica elevada. Los alimentos recientemente cocinados son fuente de este tipo de almidón (Englyst *et al.*, 1992).
- *Almidón lentamente digerible (ALDIG)*: Se refiere al almidón hidrolizado y absorbido en el intestino delgado, presentan una consistencia físicamente inaccesible amorfa, con almidón de estructura cristalina en forma de gránulos retrogradados, los cuales tienen una baja respuesta glicémica. Está presente en la mayoría de los cereales crudos (Englyst *et al.*, 1992) y retrogradado en alimentos cocidos (Sajilata *et al.*, 2006).
- *Almidón resistente (AR)*: que es un almidón modificado o fracciones de almidón que no son absorbidos en el intestino delgado, y se considera como fibra dietética, con beneficios para la salud (Englyst *et al.*, 1992; Haralampu, 2000).

En la actualidad los almidones resistentes han generado un amplio interés en el ámbito mundial tanto por los beneficios potenciales en la salud como por sus propiedades funcionales. Los estudios clínicos demuestran que los almidones resistentes tienen propiedades fisiológicas beneficiosas en humanos, pudiendo prevenir enfermedades.

### 2.2.6 Clasificación del almidón resistente

El almidón resistente (AR) puede ser considerado como un ingrediente funcional que aumenta la calidad de los alimentos (Pacheco, 2001; Juarez *et al.*, 2006; Pacheco, 2002), ya que muestran una alta resistencia a la digestión tanto “*in vitro*” como “*in vivo*”. Estudios previos en ratas indican que la ingesta de harina de plátano verde (17 % de almidón resistente) puede reducir los niveles de colesterol y triglicéridos en sangre. Esta resistencia a la hidrólisis puede ser explicada por varios factores como grado y tipo de cristalinidad, contenido de amilosa y morfología del gránulo de almidón (Pacheco, 2001). En función de sus diferencias se ha agrupado el AR en diferentes tipos:

- *Almidón resistente tipo 1 (AR-I)*: representa el almidón que es físicamente inaccesible, atrapados dentro de una matriz celular, como en las leguminosas

(González *et al.*, 2006). La cantidad de este tipo de almidón es afectada por el procesamiento de los alimentos y puede disminuirlo o eliminarse por medio de la molienda (Englyst *et al.*, 1992), además, es estable a las operaciones normales de cocción lo que posibilita su uso como ingrediente en alimentos convencionales (Sajilata *et al.*, 2006).

- *Almidón resistente tipo 2 (AR-II)*: representa los gránulos nativos de almidón cuya cristalinidad hace difícil su hidrólisis enzimática como los almidones de papa cruda y de plátano verde (González *et al.*, 2006). El almidón gelatinizado es más fácilmente digerido por las  $\alpha$ -amilasas que el almidón nativo. De esta manera, el almidón resistente tipo 2 dependerá de la temperatura alcanzada, del tipo de proceso y la gelatinización (González, 2008).
- *Almidón resistente tipo 3 (AR-III)*: Son los almidones retrogradados (amilosa y/o amilopectina), que pueden haberse formado en alimentos cocinados y almacenados a temperatura ambiente o bajas (González *et al.*, 2006, McCleary, B & Monaghan, D, 2002). El almidón resistente tipo 3 es completamente resistente a la digestión por amilasas pancreáticas (Sajilata *et al.*, 2006).
- *Almidón resistente tipo 4 (AR-IV)*: La resistencia enzimática de este tipo de almidón es debido a una modificación química o térmica. La formación de enlaces glucosídicos diferentes en los enlaces  $\alpha$  (1,4) o  $\alpha$  (1,6) por tratamiento térmico, reducen la disponibilidad para las enzimas amilolíticas. También los enlaces cruzados o la presencia de algunos sustituyentes (por ejemplo, hidroxipropilos) pueden reducir la digestibilidad del almidón.
- *Almidón resistente tipo 5 (AR-V)*: Consiste en complejos lípido-amilosa que se forman cuando la amilosa y las largas cadenas ramificadas de amilopectina interactúan con ácidos grasos y alcoholes. Estos complejos pueden formarse durante el procesamiento/cocción como el pan que contiene grasa, o artificialmente como los almidones altos en amilosa acomplejados con ácidos grasos.

El AR tiene un poder energético inferior al almidón completamente digerible (1.6-2.8 kcal/g *versus* 4 kcal/g), por lo que puede ser una buena alternativa para hacer reemplazo o sustitución de ingredientes en alimentos altos en calorías. Por ejemplo, la industria de la panificación, pastelería, galletería y cereales extruidos utiliza diversidad de almidones, los cuales podrían irse reemplazando por almidones que contengan alto porcentaje de AR como aquellos procedentes de harina de plátano o de leguminosas.

Aplicaciones de lo descrito anteriormente se pueden encontrar en la elaboración del pan, donde se ha logrado reemplazar hasta en un 7% la harina de trigo por harina de plátano que contiene un 16% de AR. Mientras que en países como Venezuela se han formulado pastas de sémola parcialmente sustituidas con un 10-12% de harina de leguminosas, en Chile algunos estudios piloto han mostrado la aceptabilidad de pan elaborado con harina de piñón como fuente de AR en reemplazo de harina de trigo en un 30%. Sin embargo, aún son pocos estudios que evalúen la composición y/o funcionalidad del AR en alimentos de consumo masivo dentro del mercado alimentario.

Cabe señalar que, si bien la presencia de AR en los alimentos procesados está determinada por su incorporación intencional en el producto final, hay que considerar que el AR también se podría producir por modificación de algunas condiciones de procesamiento del alimento, tales como pH, temperatura de calentamiento y tiempo, número de ciclos de calentamiento y enfriamiento, congelación y secado. En este sentido, la formación de AR ocurre rápidamente en almidones con altos niveles de amilosa (Sievert y Pomeranz, 1989) debido a que cadenas largas de  $\alpha$ -glucano son necesarias para formar las estructuras cristalinas. Por otro lado, la retrogradación y la formación de AR podrían también ocurrir en almidones cerosos cuando son calentados y enfriados. Los cambios que ocurren en la estructura de los almidones durante el calentamiento y enfriamiento han sido estudiados ampliamente debido a su gran influencia sobre las propiedades funcionales de los alimentos. Por otro lado, este procesamiento del almidón es de considerable importancia nutricional debido a su menor digestibilidad en el tracto intestinal.

### **2.2.7 Efecto del almidón resistente sobre el índice glucémico**

Se han realizado varios estudios para dilucidar el efecto del AR sobre la sensibilidad a la insulina a través de estudios *in vivo*. Un metaanálisis de ensayos publicados reveló que el AR mejora la resistencia a la insulina y promueve la pérdida de masa corporal en pacientes que padecen diabetes mellitus, especialmente pacientes obesos (Gao *et al.*, 2019). Sin embargo, no se observó ningún efecto en la sensibilidad a la insulina en las mujeres, lo que sugiere una interacción con el género del individuo (Maki *et al.*, 2012). También se observó una disminución en la presión arterial diastólica y glucosa en ayunas, pérdida de peso, una reducción en la circunferencia de la cintura y la cadera cuando personas con prediabetes o diabetes consumieron diariamente 4.5 g de AR-II durante 24 semanas (Costa *et al.*, 2019). Este podría ser un hallazgo prometedor, ya que las autoridades sanitarias han señalado

que la ingesta de fibra dietética debe ser de 25 a 30 g por día (FDA, 2016). Se observó que el efecto de AR en pacientes diabéticos delgados era menor que en los participantes diabéticos obesos (Zhang. Et al.,2007; Kwak, Paik y Kim, 2012).

En cambio, Loble y col. (2013) encontraron que el AR aumentó la microbiota del colon cuando los individuos fueron suplementados con AR. Sin embargo, la mejora en la sensibilidad a la insulina fue relativamente pequeña en comparación con los efectos de una pérdida de peso moderada. Es de notar que las aplicaciones alimentarias de AR tipo IV no se han investigado tan ampliamente como las del AR tipo II y III (González-Amaro *et al.*, 2015).

El consumo de AR se ha asociado a efectos fisiológicos sistémicos, incluido el control del metabolismo glicémico. Se ha reportado que en alimentos con alto contenido de amilosa se observa, tanto el aumento del contenido de AR como la disminución de la respuesta glicémica. Al respecto, se sabe que la relación amilosa/amilopectina debe ser superior a 1:1 y la cantidad de AR en una comida debe ser superior a 8 g para reducir significativamente la glucosa e insulina plasmática. Con respecto al manejo de lípidos los resultados son menos concluyentes, sin embargo, se sugiere que el AR disminuye los niveles plasmáticos de colesterol total.

Los mecanismos que permiten explicar la regulación de la glicemia por AR están probablemente relacionados con un menor contenido de hidratos de carbono disponibles para la absorción y un incremento en la producción de ácidos grasos de cadena corta, esto último asociado a una mayor liberación de incretinas como PYY (péptido YY) y GLP-1 (péptido similar al glucagón-1). El péptido YY aumenta la captación periférica de glucosa en los músculos y en el tejido adiposo, mientras que GLP-1 aumenta la secreción de insulina y disminuye la producción de glucagón en el páncreas. En este sentido, GLP-1 ha demostrado estar aumentada significativamente después de una intervención de 12 semanas con 40 g/día de AR en 17 pacientes con diabetes mellitus tipo 2.

### **2.2.8 Productos comerciales de almidón resistente**

Se han desarrollado almidones resistentes químicamente modificados para mejorar la funcionalidad tecnológica de los productos alimenticios. Las modificaciones del almidón alteran sus grupos hidroxilo de glucosa por esterificación, eterificación, oxidación o cualquier combinación de estos procesos que impiden la formación del complejo sustrato-

enzima (Villaroel *et al.*, 2018). El principal objetivo de estas modificaciones es reducir la interacción de la amilosa después del proceso de gelatinización para evitar la recristalización de las moléculas de amilosa. Es deseable reducir la recristalización del almidón en los productos de panadería, ya que aumenta su vida útil. Aunque el almidón modificado químicamente puede considerarse un compuesto de índice glucémico bajo, su uso en productos alimenticios se ha extendido ampliamente como ingrediente funcional en lugar de como ingrediente de índice glucémico bajo. A continuación, se enlistan algunos productos comerciales de almidón resistente:

Hi-Maize es un ejemplo de AR-II que ha demostrado ser un éxito comercial, ya que tiene una amplia gama de aplicaciones, desde panadería hasta sopas y pastas (Ingredion, 2014a, 2014b). Uno de los activos de AR es su bajo precio en comparación con AR-IV, ya que no se requiere ningún procesamiento adicional de la harina. Además, el AR-II puede resultar más atractivo para los consumidores, ya que es un producto mínimamente procesado (Osborn, 2015, págs. 207-221).

Por su parte, el AR-III se encuentra generalmente en productos con alto contenido de amilosa como resultado de la retrogradación (es decir, proceso de enfriamiento y calentamiento). Recientemente, se utiliza la tecnología de extrusión ya que el alto cizallamiento provoca la despolimerización de moléculas de almidón ramificadas en moléculas lineales, que son propensas a la retrogradación (Beigh, Hussain, Qadri y Naseer, 2019). Esta tecnología es prometedora en la fabricación de productos crujientes bajos en grasa con un componente de fibra de AR-III que, en última instancia, beneficiará a los consumidores. Algunos estudios se han centrado en optimizar las mejores condiciones de horneado (tiempo y temperatura) para obtener los mejores resultados para la obtención de AR-III (Olawoye, Gbadamosi, Otemuyiwa, Y Akanbi, 2020).

Novelose 330 es un producto de AR-III disponible comercialmente (Ingredion, 2014a, 2014b). El AR-III también es un ingrediente conveniente para el etiquetado limpio en formulaciones de bajo índice glucémico, ya que se modifica físicamente.

Fibresym es un producto comercial de AR-IV popular (Ingredion, 2014a, 2014b). El ingrediente más popular es el almidón de maíz con alto contenido de amilosa (JAMONES).

En cuanto a la regulación de la comercialización y uso del almidón resistente en la industria alimentaria, éste ha ganado el reconocimiento como fibra dietética de varias agencias, como la Asociación Internacional Estadounidense de Químicos de Cereales (AACC), el

comité del Codex y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) (MGP Ingredientes, 2018). Los tipos I y II no requieren aprobación para su uso alimentario ya que los gránulos de almidón se han mantenido intactos. Aunque el tipo III requiere aprobación, ha sido ampliamente aceptado (MGP Ingredientes, 2020). Además, el AR-III se puede encontrar fácilmente en productos de panadería habituales. Sin embargo, no se puede afirmar que sean de bajo índice glucémico ya que la cantidad de AR encontrada es insuficiente para tener repercusiones en el índice glucémico.

## **2.3 Alimentos funcionales**

Los productos alimentarios siempre han sido elaborados con el objetivo de satisfacer las exigencias del consumidor en cuanto a sabor, apariencia, valor y comodidad. La idea de diseñar productos alimentarios con efectos beneficiosos para la salud es relativamente nueva y responde al cada vez mayor reconocimiento del papel de la dieta en la prevención y tratamiento de enfermedades (G. Maza, 2000. Pág. 493)

### **2.3.1 Origen y definición**

La primera evidencia escrita de la existencia de alimentos funcionales se remonta al año 1000 a.C. en China. Asia tiene una larga tradición de atribuir propiedades curativas o terapéuticas a los alimentos y las hierbas, pero esas creencias se han considerado anecdóticas y se basan en tradiciones populares. En Japón se introdujeron casos específicos de alimentos funcionales en la década de 1980. Luego, el gobierno japonés financió tres programas de investigación, que consistían en el análisis y desarrollo de las funciones de los alimentos, el análisis de las regulaciones fisiológicas de la función de los alimentos y el análisis de los alimentos funcionales y el diseño molecular. Esos fueron los esfuerzos nacionales para reducir los crecientes costos de la atención médica. En consecuencia, se estableció el concepto de “alimentos para uso sanitario específico” (FOSHU, por sus siglas en inglés) en 1991, ya que se esperaba que esos alimentos tuvieran efectos específicos en la salud mediante la adición de componentes relevantes o la eliminación de alérgenos. Estos efectos fueron evaluados científicamente y se otorgó permiso para hacer afirmaciones sobre efectos beneficiosos específicos para la salud después de su consumo, pero solo en forma de alimentos comunes (Tur & Bibiloni, 2016).

En los Estados Unidos, la historia de los alimentos funcionales comenzó en 1989 cuando los 'alimentos diseñados' se formularon como alimentos que contenían productos químicos naturales o enriquecidos y no nutrientes biológicamente activos de plantas (fitoquímicos) que eran eficaces para reducir el riesgo de cáncer. A continuación, en 1991, los 'alimentos funcionales' se definieron como alimentos que contienen sustancias (naturales o de otro tipo) para las que existe evidencia de que, tras su ingestión, se produce un efecto positivo en la salud. Desde entonces, se lanzaron varios términos exóticos, como alimentos diseñados genéticamente, alimentos farmacéuticos, fitofoods, fitonutrientes, sustancias fitogénicas, alimentos de rendimiento, alimentos inteligentes, alimentos terapéuticos, alimentos con valor agregado, alimentos genómicos, fuentes fitoquímicas, alimentos superiores, alimentos hipernutritivos, y alimentos reales (Tur & Bibiloni, 2016).

En la Unión Europea, la Acción Concertada sobre Ciencias de los Alimentos Funcionales en Europa (FUFOSE) fue coordinada por el Instituto Internacional de Ciencias de la Vida a través de varias reuniones: Francia 1996, Helsinki 1997 y Madrid 1998. Finalmente, se alcanzó un consenso en 1999, en el que participaron tres pasos principales: **(1)** una evaluación crítica de la base científica requerida para proporcionar evidencia de que los nutrientes y componentes de los alimentos específicos afectan positivamente las funciones objetivo (respuestas biológicas) en el cuerpo, **(2)** un examen de la ciencia disponible desde un enfoque más bien impulsado por funciones que una perspectiva promovida por el producto, y **(3)** la elaboración de un consenso sobre modificaciones específicas de los alimentos y los constituyentes de los alimentos y sobre las opciones para sus aplicaciones.

De acuerdo con el documento de consenso FUFOSE, un alimento puede considerarse 'funcional' si se demuestra satisfactoriamente que afecta de manera beneficiosa una o más funciones objetivo en el cuerpo, más allá de los efectos nutricionales adecuados, de una manera que sea relevante para un mejor estado de salud y bienestar, o una reducción del riesgo de enfermedad. Los alimentos funcionales deben seguir siendo alimentos y deben demostrar sus efectos en cantidades que normalmente se espera que se consuman en la dieta. Un alimento funcional puede ser un alimento natural o puede contener uno o más componentes específicos, que tienen influencia funcional sobre la salud y el bienestar del consumidor. Dichos componentes se pueden agregar a los alimentos (p. ej., ácidos grasos omega-3), eliminar de los alimentos (p. ej., grasa de la leche), mejorar de forma natural mediante condiciones especiales (p. ej., ajo enriquecido con selenio) o modificar para

proporcionar beneficios para la salud (p. ej. probióticos con fitoesteroles) (Tur & Bibiloni, 2016).

### **2.3.2 Beneficios del desarrollo de alimentos funcionales**

Los alimentos funcionales están evolucionando como una estrategia potencial en la prevención de enfermedades crónicas ya que se supone que tiene efectos beneficiosos fisiológicos, estos alimentos tienen bioactivos específicos agregados por sus beneficios para la salud, contienen una cantidad mayor de nutrientes promocionando comodidad a los consumidores. Estos alimentos pueden estar destinados a toda la población o a grupos determinados, que se pueden definir, por ejemplo, según su edad o su constitución genética. El mercado de los alimentos funcionales se está expandiendo, lo que ilustra una mejor comprensión de la toma de decisiones de los consumidores de estos alimentos para guiar la política alimentaria y las decisiones financieras (Fuentes Berrio *et al.*, 2015).

La industria de los alimentos funcionales está creciendo enormemente con tasas de crecimiento anual de 48% y las estimaciones del mercado global de hasta \$167 mil millones. Esta evolución importante de los alimentos funcionales es posible debido a que la nutrición actual está enfocada a la prevención de las enfermedades crónicas no transmisibles, donde la dieta y el estilo de vida desempeñan roles etiológicos. Los consumidores están preocupándose cada vez más de su autocuidado y esperan, a través de los alimentos consumidos, alcanzar o mantener su salud y bienestar. La respuesta a esta demanda ha sido el vertiginoso desarrollo de la industria de los «alimentos funcionales» (AF), que además de su aporte de nutrientes clásicos contienen numerosos fitoquímicos cuyo consumo contribuye a la mantención de la salud óptima (Fuentes Berrio *et al.*, 2015).

Dado que los efectos beneficiosos funcionales se derivan de compuestos activos dietéticos (componentes funcionales), el diseño y el desarrollo de estos alimentos requieren estrategias para la definición y optimización, ya sea mediante el aumento de la proporción de aquellos que exhiben efectos beneficiosos o bien limitando el contenido de otros que tienen consecuencias negativas para la salud. En general, las áreas de la fisiología humana que son relevantes para los alimentos funcionales son las siguientes (Fuentes Berrio *et al.*, 2015):

Desarrollo y crecimiento tempranos. La nutrición durante el desarrollo temprano tiene efectos a corto plazo sobre el crecimiento, la composición corporal y las funciones, así como efectos a largo plazo. El curso del embarazo y el parto y la composición de la leche materna están influenciados por la ingesta de alimentos. El embarazo y los primeros meses postnatales son un período crítico para el desarrollo del sistema nervioso y las capacidades sensoriales y cognitivas, así como para el desarrollo de respuestas inmunes, masa ósea y crecimiento y maduración intestinal. Por lo tanto, se han diseñado varios alimentos funcionales para proporcionar una ingesta adecuada de nutrientes tanto a la madre como al niño, como la adición de ácido fólico a los productos de panadería, harina y cereales para reducir los defectos del tubo neural en los recién nacidos.

Defensa contra el estrés oxidativo. Aunque el oxígeno es esencial para la vida humana, diariamente se convierten proporciones variables de oxígeno en especies reactivas de oxígeno (ROS) en las mitocondrias. Las ROS pueden alterar las estructuras corporales a través del daño oxidativo, es decir, oxidando proteínas, peroxidando lípidos, modificando los ácidos nucleicos y alterando las membranas celulares. Como tales, pueden estar en el origen de enfermedades como enfermedades cardiovasculares (ECV), síndrome metabólico, anemia, varios cánceres, cataratas, deterioro del sistema inmunológico y enfermedades degenerativas del sistema nervioso, así como el envejecimiento. El cuerpo humano se defiende de las ROS no solo por medio de antioxidantes endógenos, como superóxido dismutasa, catalasa, glutatión peroxidasa o glutatión reductasa, sino también por medio de antioxidantes exógenos, como las vitaminas, retinol y carotenoides, polifenoles, y minerales como el selenio y el zinc que son constituyentes de metaloproteínas antioxidantes. Se pueden consumir alimentos ricos en antioxidantes para mejorar las defensas antioxidantes del cuerpo y prevenir o minimizar varias enfermedades, esto a través de la adición de antioxidantes recuperados a partir de materiales vegetales. Sin embargo, un aumento en las concentraciones de antioxidantes en la dieta no siempre conduce a una disminución de la enfermedad y, a veces, incluso a efectos prooxidativos preocupantes y al cáncer.

Fisiología cardiovascular. Los eventos principales son infarto de miocardio, angina, accidente cerebrovascular y aterosclerosis. La mayoría de los alimentos funcionales que promueven la salud cardiovascular están diseñados para disminuir el contenido de grasa de los alimentos originales, principalmente al disminuir los ácidos grasos saturados o trans contenidos de ácidos grasos insaturados, así como mediante la adición de ácidos grasos

omega-3, disminuyendo el contenido de colesterol, aumentando el contenido de fitoesteroles o fitostanol, o sustituyendo el contenido de colesterol por fitoesteroles. Los alimentos ricos en antioxidantes, incluidos los flavonoides vegetales, también deben situarse en este contexto de posible protección cardiovascular, ya que pueden inhibir la oxidación de LDL, modificar las actividades de las células inmunocompetentes e inhibir la formación de factores de adhesión de célula a célula. Recientemente, se está explorando el uso de vitamina K.

Rendimiento cognitivo y mental. Algunos alimentos o componentes alimentarios podrían tener efectos sobre el estado de ánimo, la cognición o el estado mental, y estos efectos se caracterizan por un alto grado de subjetividad, con grandes diferencias en la respuesta entre las personas, principalmente debido a la edad y el género. Los alimentos ricos en carbohidratos, a través de una elevación de la glucemia, pueden influir en el rendimiento mental al mejorar la memoria y el tiempo de decisión; sin embargo, las comidas ricas en carbohidratos pueden producir somnolencia. Generalmente, los carbohidratos con un índice glucémico alto pueden provocar hipoglucemia debido a respuestas excesivas de la insulina. Sin embargo, la sacarosa, la base de la mayoría de los dulces, también puede aliviar la angustia y activar los opioides endógenos, lo que reduce la percepción del dolor. El triptófano puede disminuir la latencia del sueño y aumentar la somnolencia y la fatiga, probablemente debido a su conexión con el metabolismo de la serotonina. El alcohol afecta la mayoría de las funciones psicológicas y conductuales (estrés, cognición, estado de ánimo y apetito) y sus efectos dependen de la dosis. Además, varios componentes de los alimentos, como la cafeína, la teofilina y la teobromina, y las plantas, como el guaraná, la valeriana, el ginseng y el bálsamo, muestran efectos bien conocidos sobre el rendimiento cognitivo y mental.

Rendimiento físico y aptitud. La actividad física exige un elevado aporte no solo de energía sino también de agua, glucosa, proteínas, electrolitos, vitaminas y antioxidantes. También es bien sabido que el vaciado gástrico y, por tanto, la absorción intestinal, está influenciado por las características fisicoquímicas y la temperatura de los alimentos. Después de una actuación física, es necesario reponer los reservorios de glucógeno, potenciar las fibras musculares dañadas, reponer electrolitos y pérdidas de agua por sudoración, y evitar el estrés oxidativo y su posterior hemólisis leve y depresión de las células inmunes que suelen aparecer durante y después del ejercicio. Estos cambios son la razón fundamental detrás

del desarrollo de alimentos funcionales como barras energéticas, bebidas antioxidantes o bebidas isotónicas.

Fisiología gastrointestinal. El intestino es un objetivo obvio para el desarrollo de alimentos funcionales, porque es una interfaz entre la dieta y el cuerpo. La microbiota intestinal, junto con el sistema inmunológico gastrointestinal, proporcionan la base de una barrera intestinal que evita que las bacterias patógenas invadan el tracto digestivo y, finalmente, la sangre y todo el organismo. Por tanto, la conservación del número y la composición de la microbiota intestinal es esencial. Se han abordado tres estrategias de alimentos funcionales para promover un microbiota más saludable: prebióticos, probióticos y simbióticos. Los prebióticos son ingredientes alimentarios no digeribles, principalmente oligosacáridos, que estimulan el crecimiento y/o modifican la actividad metabólica de una o varias especies bacterianas en el colon que potencialmente mejoran la salud intestinal. No deben hidrolizarse ni absorberse en la parte superior del tracto digestivo, deben transferirse significativamente al colon y deben ser un sustrato selectivo de microorganismos probióticos, el almidón resistente puede clasificarse como prebiótico. Los *probióticos* son ingredientes alimentarios microbianos vivos, principalmente *Lactobacillus* y *Bifidobacteria*, combinados o no, que, cuando se ingieren en cantidades suficientes, tienen beneficios para la salud de los consumidores al actuar directa o indirectamente a través de interacciones con la microbiota intestinal. Sus principales beneficios para la salud son el alivio de la intolerancia a la lactosa y la estimulación inmunológica para reducir la incidencia de infecciones digestivas y también para reducir la incidencia de lesiones precancerosas. Los probióticos son solo transitorios en el intestino y no se convierten en parte de la microbiota intestinal, por lo tanto, el consumo regular es necesario para mantener efectos favorables. Los simbióticos son mezclas de prebióticos más probióticos destinados a aumentar la supervivencia de las bacterias promotoras de la salud en el intestino. Los probióticos se aplican principalmente, pero no exclusivamente, en los productos lácteos, mientras que los prebióticos se pueden encontrar en los productos lácteos, panes y alimentos horneados, aderezos para ensaladas y productos cárnicos.

Regulación de los procesos metabólicos básicos. El control de la glucemia y de los índices glucémicos alimentarios y el control del contenido de almidón, fibra y grasa son aspectos de interés para prevenir enfermedades crónicas no transmisibles como obesidad, diabetes, dislipidemia y síndrome metabólico. Los alimentos enriquecidos con fibra y/o almidón resistente, o los productos lácteos desnatados son alimentos funcionales encerrados en

esta área, pero también lo es la fortificación de alimentos con calcio y vitamina D como estrategia para mejorar la densidad mineral ósea (Fuentes Berrio et al., 2015).

### **2.3.3 Alimentos funcionales basados en almidón de digestión lenta y resistente**

La funcionalidad del almidón depende de la proporción de amilosa/amilopectina, así como el grado de polimerización, cristalinidad y contenido de minerales. El almidón de digestión lenta (ADL) es amorfo y bioinaccesible, presentando estructuras cristalinas de tipo A y C en cereales sin cocinar, mientras que las de tipo B se presentan en raíces y tubérculos. Estas estructuras impiden la acción de la  $\alpha$ -amilasa salival y del ácido gástrico, lo cual hace que la mayor parte de su digestión ocurra en el duodeno, mediante la  $\alpha$ -amilasa pancreática (Miao, Jiang, Cui, Zhang & Jin, 2015). La digestión del ADL se lleva a cabo entre los 20 y los 120 minutos después de su ingesta, resultando en una liberación lenta y sostenida de glucosa. Sus características y tiempos de digestión se relacionan también con la longitud de la cadena, los puntos de ramificación, morfología y su fuente (Magallanes-Cruz, Flores-Silv, & Bello-Perez, 2017).

En contraste con el ADL, el AR no es hidrolizado pasados los 120 minutos, y pasa al intestino grueso para ser fermentado por las bacterias del colon (Raigond, Ezekiel, & Raigond, 2015). De acuerdo con esto, el AR es definido como aquel que evade la digestión en el intestino delgado y es fermentado en el colon, con una consecuente producción de ácidos grasos de cadena corta, hidrógeno, metano y dióxido de carbono. Como se ha mencionado, el AR se subclasifica en almidón no disponible físicamente, gránulos nativos de digestión lenta, almidón retrogradado, almidón modificado químicamente y complejos amilo-lipídicos (Dupuis, Liu, & Yada, 2014). El AR ha tomado una gran importancia por los efectos positivos a la salud, tales como mejoramiento de la microbiota y salud colónica, disminución del índice glicémico y disminución del colesterol sérico. Esto ha permitido su uso en la elaboración de alimentos funcionales para prevenir y manejar enfermedades crónicas como la diabetes mellitus (Ashwar, Gani, Shah, Wani, & Masoodi, 2016).

Diversos estudios se han enfocado en analizar los efectos del ADL y el AR cuando se utilizan en la formulación de diversos alimentos. Por ejemplo, la utilización de harina integral en sustitución de harina refinada, incrementa la concentración de ADL en diversos productos. Borczak *et al.* (2016), demostraron que la adición de frutos liofilizados con contenido elevado de compuestos polifenólicos a panes integrales, puede incrementar el

ADL y AR, los cuales reducen la glicemia postprandial. Poquette, Gu & Lee (2014), desarrollaron un muffin a base de granos de sorgo con harina alta en ADL y AR. El producto indujo menores valores de glicemia e insulinemia, mostrando que los granos de sorgo pueden fungir como ingredientes funcionales en el manejo de la glucosa.

Li, Koecher, Hansen, & Ferruzzi (2017), evaluaron el impacto de compuestos polifenólicos en productos a base de avena (cereal, barra y papilla), sobre la digestibilidad del almidón y el transporte de glucosa a nivel intestinal. Los resultados de un modelo de digestión *in vitro* acoplado a un modelo de células intestinales Caco-2, mostraron que la hidrólisis de la maltosa fue menor, y que los polifenoles libres y unidos (ácido ferúlico, ácido cafeico, ácido gálico, ácido p-cumárico y ácido sinápico), atenuaron el transporte de glucosa.

Varios productos naturales cuentan con AR, por ejemplo, granos enteros, tubérculos y leguminosas; los alimentos con mayor contenido son la papa cruda y el plátano inmaduro. Sin embargo, la concentración de AR puede incrementarse mediante métodos genéticos (cruzamiento de variedades con altos contenidos de amilosa e inhibición de enzimas ramificadoras de almidón), tratamientos físicos (hidrotermales, alta presión hidrostática, extrusión), químicos (tratamiento con ácidos, tratamiento con anhídrido succínico, fosforilación, carboximetilación, oxidación, acetilación, hidroxipropilación) y enzimáticos.

Por sus propiedades fisicoquímicas, que promueven la formación de geles, el aumento de viscosidad y la retención de agua, el AR se ha incorporado a una gran variedad de productos, principalmente de panadería. Al ser un carbohidrato no digerible, es considerado fibra, y se añade para reemplazar la fibra insoluble sin afectar la reología de la masa, o bien, para la sustitución de grasa en productos lácteos (Ashwar *et al.*, 2016).

#### **2.3.4 Alimentos funcionales a partir de plátano comercialmente disponibles**

Si bien existen numerosos reportes científicos sobre alimentos funcionales desarrollados a partir de harina de plátano y almidón resistente tipo IV, como se presentó en las secciones 2.1.4 y 2.3.3, se fijó especial interés en localizar productos comercialmente disponibles para tener una primera visión sobre la factibilidad técnica y comercial del presente proyecto. De acuerdo con una búsqueda en la web realizada en abril de 2022, no se hallaron harinas comerciales para hotcakes desarrolladas a partir de plátano, pero sí diferentes recetas que son difundidas en redes sociales a través de videos y/o imágenes acompañadas de texto, y que tienen como fin promover el uso de este producto agrícola para el desarrollo de

hotcakes funcionales, o saludables como se citan en las redes. Algunas de las recetas utilizan harina de plátano macho y otras utilizan la pulpa de plátano macho inmaduro y/o maduro, inclusive en mezcla con plátano roatán maduro para mejorar el sabor.

La harina funcional para hotcakes que se localizó en la web es una elaborada a partir de arroz integral y coco (Figura 2.6a), comercialmente se promueve como harina enriquecida con proteína. En cuanto a alimentos funcionales a partir de plátano fue posible localizar harina de plátano para brownies (Figura 2.6b) y harina de plátano verde y chícharo útil para horneados libres de gluten (Figura 2.6c).

Existe entonces un interés social tangible por el uso de la harina de plátano macho como ingrediente funcional y esto resalta la importancia científica, técnica y comercial de la presente investigación.



**Figura 2.6** Alimentos funcionales disponibles comercialmente relacionados con el presente proyecto de investigación: harina para hotcakes con arroz integral y coco (a), harina de plátano para brownies (b) y harina de plátano verde y chícharo útil para horneados libres de gluten (c). Fuentes: Morama. (2018, 28 septiembre). Harina para hotcakes con arroz

integral y coco [Fotografía]. <https://www.amazon.com.mx/>. M.P. (s. f.-a). Harina de plátano para brownies [Fotografía]. <https://molinodepiedra.com.mx/>. N.S. (s. f.). Glucotein (Harina de plátano verde y de chícharo) [Fotografía]. <https://www.tiendanaturalslim.com>.

## **2.4 Alimentos funcionales realizados con almidon resistente: evaluación de propiedades reológicas**

### **2.4.1 Evaluación de cuatro tipos de almidón resistente en el desempeño de horneado de muffins y su relación con la reología de la masa**

La mayor conciencia de los consumidores sobre la relación entre alimentación, estilo de vida y salud ha sido una de las razones de la popularidad de los alimentos ricos en fibra. Recientemente, el almidón resistente (AR) ha ganado importancia como nueva fuente de fibra dietética. Según su digestión in vitro el almidón se clasifica en: almidón de rápida digestión; almidón de lenta digestión; y almidon resistente (AR) . En particular, AR se refiere a la suma de almidón y productos de degradación del almidón no absorbidos en el intestino delgado de individuos sanos. El hecho de que el AR escape a la digestión le confiere muchos efectos positivos para la salud. El efecto fisiológico positivo del AR incluye reducir la respuesta glucémica, actuar como prebiótico funcional para algunos microorganismos probióticos y aumentar la producción de ácidos grasos de cadena corta en el intestino grueso.

Se han identificado cuatro tipos de AR . El AR tipo 1 (AR1) es un almidón físicamente inaccesible que se encuentra en los alimentos ricos en almidón, que no están fraccionados ni refinados, principalmente legumbres y algunos cereales. AR tipo 2 (AR2) se refiere a gránulos de almidón nativo resistente. AR tipo 3 (AR3) comprende almidones retrógrados. Finalmente, el AR tipo 4 (AR4) está formado por almidones modificados químicamente. Diferentes fuentes de AR2 y AR3 de diferentes orígenes y con diferentes porcentajes de AR están disponibles como ingredientes comerciales en el mercado europeo para ser incluidos en los alimentos. En comparación con las fibras tradicionales, como cereales integrales o salvados, los AR tienen la ventaja de afectar menos las propiedades sensoriales de los productos finales, lo que es muy positivo para garantizar la aceptabilidad

del consumidor. Se ha enriquecido una amplia gama de alimentos con AR, incluido el pan , pasteles , magdalenas, pasta y comida rebozada .

En 2008, Sanz *et al.*, evaluaron cuatro tipos de almidón resistente (AR) en el desempeño de horneado de muffins y su relación con la reología de la masa. Se prepararon muffins sin AR (muffin convencional como control) y con cuatro tipos de AR. Todas las formulaciones se prepararon utilizando la misma cantidad de todos los ingredientes, excepto la harina y AR . Los AR empleados fueron dos muestras diferentes de AR2 (Hi-maize 260, y Novelose 240) de National Starch Food Innovation, y dos muestras diferentes de AR3 (Novelose 330 de National Starch and Food Innovation, y C\*Actistar 11700 de Cargill). Las características proporcionadas por el proveedor son: Hi-maize 260 (AR granular derivado de almidón de maíz con alto contenido de amilosa, 60 % de fibra dietética; Novelose 240 (AR granular derivado de almidón de maíz con alto contenido de amilosa, 40 % de fibra dietética); Novelose 330 (retrogradado almidón de maíz con alto contenido de amilosa, 38% de fibra dietética máxima); C\*Actistar 11700 (almidón retrógrado de tapioca, 50% de almidón resistente).

El tipo AR afectó la reología del rebozado y las propiedades de los alimentos rebozados . Se descubrió que el AR2, Hi-maize 260, reducía la viscosidad de la masa; por otro lado, se encontró un aumento en la viscosidad del rebozado con AR3, Novelose 330. El color final del alimento rebozado se vio afectado significativamente por el tipo AR. El AR3 estudiado (Novelose 330 y C\*Actistar) proporcionó un color significativamente más oscuro que el AR2 (Hi-maize 260) (Sanz *et al.*, 2008). Una vez que fueron realizadas diversas pruebas de curva de flujo y del comportamiento viscoelástico, los autores llegaron a la conclusión que el calentamiento de la masa juega un papel predictivo importante en el rendimiento de horneado de los muffins. El tipo de AR ejerce un efecto sobre las propiedades reológicas del rebozado, el cual está asociado a la altura, volumen y número de burbujas de aire del muffin. Estos resultados enfatizaron en la necesidad de considerar las diferentes propiedades de los AR para realizar la selección más adecuada entre los tipos de AR disponibles en el mercado, de acuerdo con el producto final objetivo. En cuanto a la altura del muffin, volumen y número de burbujas de aire, los AR3 resultaron más adecuados que los AR2, lo que se asoció a la mayor viscosidad y elasticidad de los primeros. Los autores comentan que otros aspectos de la calidad de los muffins, como la textura, el sabor, el color debe evaluarse más a fondo antes de poder establecer una preferencia definitiva entre los tipos de AR. También citan que futuras investigaciones sobre la organización molecular y

microestructura de los diferentes tipos de AR ayudarán a comprender sus diferentes comportamientos y ayudarán a seleccionar con éxito según su uso alimentario específico.

#### **2.4.2 Almidón resistente: efecto sobre la reología, la calidad y el envejecimiento del pan de trigo blanco**

El almidón resistente (AR) se define como una fracción del almidón, o los productos de su degradación, que no sufre ninguna acción por parte de las enzimas digestivas del tracto gastrointestinal de un ser humano sano (Englyst et al.1992), y que tiene un comportamiento fisiológico similar al de las fibras dietéticas convencionales. El interés en el uso de AR para el desarrollo de productos de panadería ha aumentado en los últimos años debido a su asociación con beneficios para la salud relacionados con diabetes, obesidad, enfermedades cardiovasculares y cáncer de colon (Higgins 2014; Sharma y cols.2008). Esta fracción de almidón tiene algunas ventajas sobre las fibras convencionales cuando se agrega a productos alimenticios. Debido a su color blanco, sabor neutro y tamaño de partícula pequeño, el AR se puede utilizar sin alterar significativamente las características sensoriales del producto (Sharma *et al.* 2008,2016), y puede usarse solo o combinada con otras fibras en diferentes productos alimenticios. Sin embargo, la cantidad de AR utilizada para reemplazar la harina depende del tipo de almidón que se utilice, el tipo de alimento y el nivel de fibra deseado (Sharma *et al.*2016).

En la panificación, la sustitución parcial de la harina de trigo por fibras puede alterar el comportamiento reológico de la masa, el tiempo de fermentación y la calidad del pan (Ronda *et al.* 2014; Rosell y Santos 2010). La cantidad de harina a sustituir está directamente relacionada con los cambios que pueden ocurrir en el desempeño panificador, como la dilución de las proteínas del gluten, la alteración de las características de absorción de agua de la harina y la interacción de la fibra con otros componentes de la formulación (Cauvain y Young1999). Se han publicado muchos estudios sobre el efecto de AR sobre la calidad y la tasa de envejecimiento del pan. Sin embargo, los resultados son controvertidos.

Algunos estudios han demostrado que AR mejora la maquinabilidad de la masa, positivamente influyendo en el rendimiento de la panificación (Sanz-Penella *et al.*2010) y dando como resultado pan con alto volumen, tamaño de miga uniforme y sabor neutro (Sharma *et al.*, 2008), así como una textura suave y tersa (Gómez *et al.*, 2013; Sanz-Penella *et al.*, 2010). Por otro lado, también se ha reportado que el AR disminuye el tiempo de

desarrollo y la estabilidad de la masa (Ozturk *et al.*, 2009), debilita el gluten (Rosell *et al.*, 2010), disminuye el volumen específico del pan y aumenta la firmeza de la miga (Altuna *et al.*, 2016; Rosell y Santos, 2010; Özturk *et al.*, 2009).

El envejecimiento del pan es un fenómeno complejo, causado principalmente por la migración de agua, la retrogradación de la amilopectina y las interacciones gluten-almidón que ocurren durante el almacenamiento (Gray y Bemiller, 2003). Estos eventos resultan en una pérdida de textura crujiente en la corteza, pérdida de capacidad de retención de agua, aumento de la firmeza de la miga y pérdida de propiedades sensoriales en los panes (Oliveira *et al.*, 2014). Los estudios han informado que el AR disminuye la tasa de retrogradación de la amilopectina (Sanz-Penella *et al.*, 2010) o se comporta como un ingrediente inerte en el sistema (Almeida *et al.*, 2013). Por otro lado, Rosell y Santos (2010) informaron que el AR contribuyó a aumentar la tasa de retrogradación de amilopectina. Estos resultados contradictorios pueden deberse a las diferentes formulaciones y métodos de panificación utilizados, diferencias que pueden influir en la viscosidad, emulsificación y capacidad de retención de agua de la masa (Curti *et al.*, 2014).

Algunos estudios han utilizado AR en combinación con otras fibras dietéticas (Almeida *et al.*, 2013; Rosell y Santos, 2010), enzimas (Altuna *et al.*, 2016), y aditivos tecnológicos (Rosell y Santos, 2010). El uso de emulsionantes, enzimas, ácido ascórbico e hidrocoloides puede minimizar los efectos nocivos de los AR en la masa (Almeida *et al.*, 2013; Altuna *et al.*, 2016; Gómez *et al.*, 2013). Por lo tanto, todavía no hay datos suficientes para permitir una comprensión completa del efecto de AR sobre la estructura de la masa, la calidad del pan y el envejecimiento.

En 2018, Barros *et al.*, realizaron un estudio donde el objetivo fue investigar sistemáticamente el efecto del AR sobre la reología de la masa y la estructura, calidad y velocidad de envejecimiento del pan, utilizando una formulación sin ningún aditivo tecnológico. Para dicho estudio utilizaron la harina de trigo con un índice de extracción del 72, Holo-maíz 260-es (un almidón de maíz alto en amilosa con 60% de AR). Los autores concluyeron que el almidón resistente actuó como ingrediente inerte, diluyó las proteínas de la harina y debilitó la masa, lo que comprometió ligeramente la red de gluten. Sin embargo, el uso de harina de alta calidad permitió sustituir hasta un 15% de la harina por AR y produjo pan con alto contenido de fibra y calidad tecnológica similar al pan control. El AR disminuyó la tasa de recristalización de amilopectina durante el almacenamiento lo que, junto con la alta capacidad de retención de agua del AR, fue responsable de disminuir la

tasa de envejecimiento del pan. Por lo tanto, los resultados demuestran que el contenido de fibra y la tasa de envejecimiento del pan se pueden mejorar mediante la adición de cantidades significativas de AR, sin afectar negativamente la calidad del pan.

### 3 JUSTIFICACIÓN

Los alimentos ricos en almidones son parte fundamental de la dieta del hombre desde la prehistoria, cambiando su manera de obtención con el transcurso del tiempo; el trigo un cereal rico en almidón, que ingerían nuestros antepasados era muy diferente en forma y calidad al de la harina de trigo que consumimos hoy en día, la refinación a la que es sometida la harina de trigo trae como consecuencia que el producto final sea un polvo blanco fino sin ningún valor nutricional.

Actualmente en México, principalmente San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca; el plátano macho (*Musa paradisiaca*) es uno de los frutos de mayor cultivo por su gran importancia comercial. Sin embargo, no toda esta producción es aprovechada. Existen épocas del año en donde hay sobreproducción y las pérdidas postcosecha se incrementan. Por esta razón es indispensable generar alternativas de aprovechamiento o transformación de esta materia prima económicamente importante para la región.

El plátano macho es un fruto rico en fibra soluble e insoluble, por lo tanto es apropiado para poder convertirlo en un nuevo producto que pueda tener un mayor valor agregado. Además, el plátano macho verde es un fruto con un alto contenido de almidón lo que lo hace favorable, así mismo la harina de plátano tiene una gran cantidad de beneficios en la salud humana. La harina de plátano es una de las harinas más equilibradas debido al gran aporte de nutrientes a nuestro organismo ya que conserva todos los grupos de vitaminas y nutrientes que la pulpa contiene en estado fresco: es rica en hidratos de carbono, sales minerales, y múltiples vitaminas, que ya se han citado. Por lo que la convierte en un producto totalmente remineralizante y energético (Montenegro, 2015).

El contenido nutrimental aportado por los hotcakes a partir de la harina de plátano macho verde, adicionado con almidón resistente tipo IV beneficiaría la salud de los consumidores de distintas edades, además de lo que se busca es una nueva alternativa para darle un valor agregado al plátano macho que en muchas ocasiones es desperdiciado en nuestra región.

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

Funcionalizar hotcakes utilizando harina y almidón resistente tipo IV de plátano (*Musa paradisiaca*) de la variedad macho.

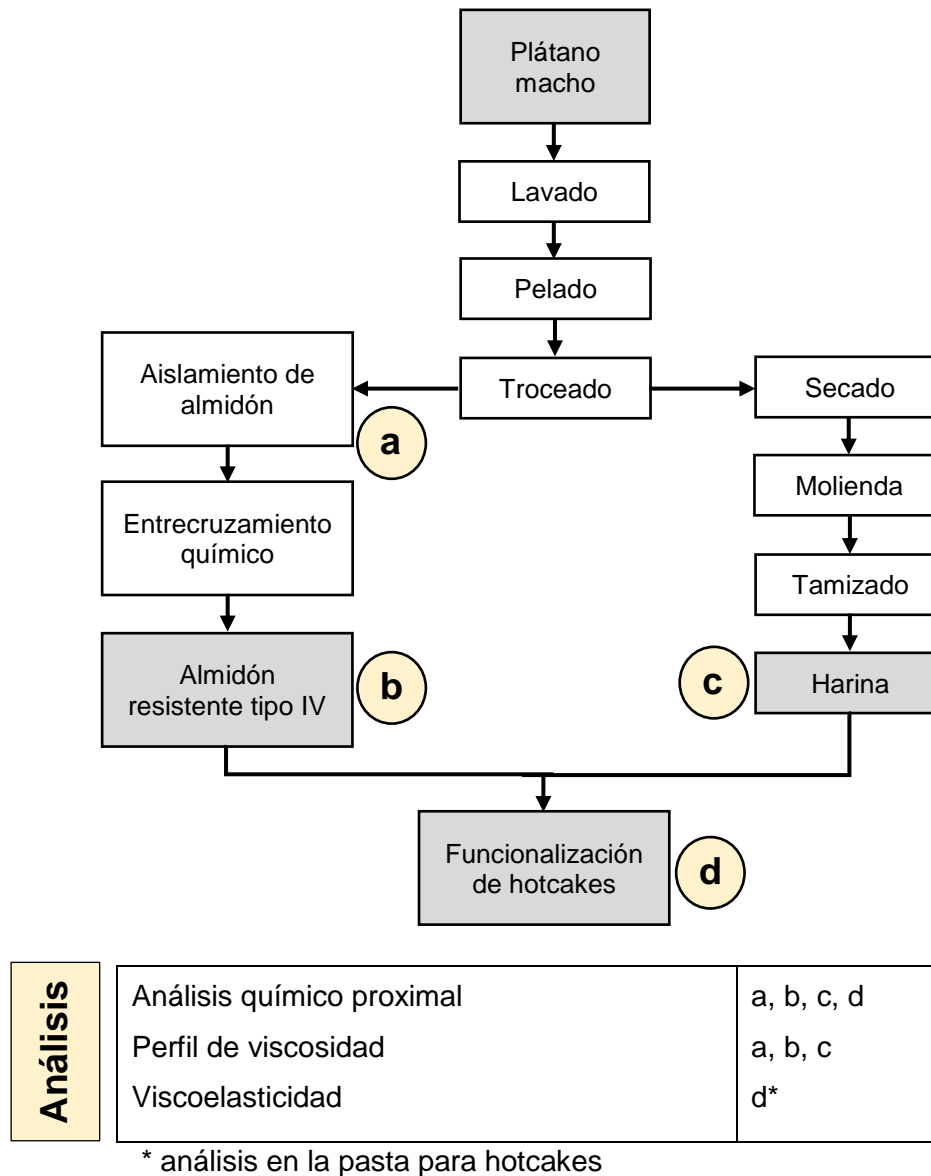
### 4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la composición proximal y el perfil de viscosidad de la harina de plátano macho y de su almidón nativo.
- Desarrollar almidón resistente tipo IV a partir del almidón nativo de plátano macho y evaluar su perfil de viscosidad.
- Estudiar el efecto de la adición de harina de plátano macho y de almidón resistente tipo IV sobre las propiedades reológicas de las pastas para hotcakes y sobre la composición proximal de los hotcakes.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Metodología general

En la Figura 5.1 se muestra el esquema general que se siguió en el presente proyecto de investigación.



**Figura 5.1** Metodología general del presente proyecto de investigación.

## 5.2 Material vegetal, materiales y químicos

El plátano (*Musa paradisiaca* L.) variedad macho en estado inmaduro se adquirió en un mercado local del municipio de San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., México. El trimetafosfato de sodio (STMP), tripolifosfato de sodio (STPP), sulfato de sodio e hidróxido de sodio se adquirieron en Sigma-Aldrich (S.L. Toluca, México). Todos los productos químicos que se utilizaron fueron de grado reactivo.

## 5.3 Producción de la harina de plátano

El plátano macho recibido se lavó en chorro de agua para eliminar suciedad y se dejó escurrir. Posteriormente se retiró la cáscara y se rebanó la pulpa fresca con un espesor aproximado de 2-5 mm. Las rebanadas se sumergieron en solución de ácido cítrico (0.3 %) para evitar su oscurecimiento. Una vez finalizado el rebanado del lote se procedió al secado en charolas a 55 °C hasta alcanzar masa constante (12-14 h aproximadamente). Las rodajas deshidratadas fueron pulverizadas en un molino de discos y el producto resultante fue tamizado utilizando una malla No. 100. La harina que pasó a través de la malla fue almacenada en recipientes herméticos hasta su posterior uso.

## 5.4 Aislamiento del almidón de plátano

El aislamiento del almidón de plátano se llevó a cabo siguiendo el método propuesto por Flores-Gorosquera *et al.*, (2004) con ligeras modificaciones. Una fracción de la harina de plátano macho se pasó sucesivamente a través de las mallas No. 40 (0.420 mm), 100 (0.149 mm), 200 (0.074 mm) y 325 (0.044 mm). Se descartó el material retenido en las mallas y el material que pasó a través de la malla 325 se dispersó en agua en una proporción harina:agua de 1:100 m:m, se dejó precipitar a 4 °C durante 12 h, y posteriormente el sobrenadante se eliminó por decantación. El precipitado se lavó tres veces por suspensión en agua y centrifugación (Heraus Megafuge, 16 R; Waltham, USA) a 4000  $\times g$  por 10 min a 25 °C. El sedimento se deshidrató en un secador de charolas (SUSESA, México) ajustado a una temperatura de 50 °C hasta alcanzar masa constante (12-14 h aproximadamente). El producto seco recolectado se trituró mediante cuchillas y se tamizó a través de la malla No. 100. El producto tamizado (almidón nativo) se almacenó en un recipiente hermético hasta su posterior uso.

## 5.5 Producción de almidón resistente tipo IV

El almidón resistente tipo IV se obtuvo mediante entrecruzamiento químico de acuerdo con lo reportado por Seib y Woo (1999), con ligeras modificaciones. Se pesaron 50 g del almidón nativo, entonces se le adicionaron 100 mL de agua, 2.98 g de STMP, 0.3 g de STPP y 2.5 g de sulfato de sodio. Se ajustó el pH de esta mezcla a 11.5 adicionando hidróxido de sodio 1 M. Esta suspensión se agitó constantemente y se calentó a una temperatura de 45 °C por 3 h. Después la suspensión se neutralizó a pH 6.5 adicionando HCl concentrado. El almidón se recuperó por centrifugación (4000  $\times$ g por 10 min a 25 °C) y se lavó por suspensión en agua 3 veces. El producto sedimentado se secó a una temperatura de 50 °C hasta alcanzar masa constante (12-14 h aproximadamente), para obtener el almidón resistente tipo IV.

## 5.6 Producción de hotcakes

Una mezcla de insumos que se especifican en la Tabla 5.1 se utilizó para preparar una pasta a temperatura ambiente. Primeramente el huevo, la harina y la leche se mezclaron en un recipiente, posteriormente se adicionó la margarina y el azúcar y se mezcló hasta que se incorporaron todos los ingredientes y no hubo presencia de grumos. Posteriormente se calentó la sartén a fuego medio, entonces se adicionó 1 porción de la pasta. Finalmente se dejó en cocción durante determinado tiempo por ambos lados. La funcionalización de hotcakes se realizó con la adición de harina de plátano y el almidón resistente tipo IV, en las proporciones de sustitución señaladas en el diseño experimental detallado en la Sección 5.12.

**Tabla 5.1** Formulación para la preparación de pasta convencional para hotcakes

Insumos	Cantidades (g)
Harina para hotcakes*	100.0
Huevo	52.0
Azúcar	13.0
Margarina sin sal	4.7
Leche	109.0
Total	203.7

\* Fracción de la formulación a sustituir por harina de plátano y almidón resistente tipo IV.

## 5.7 Análisis químico proximal

El análisis químico proximal se realizó mediante la metodología propuesta por la AACCI (2000). Las pruebas se realizaron por duplicado.

### 5.7.1 Humedad

El contenido de humedad se determinó por pérdida de masa en estufa al vacío de acuerdo con el método 44-16.01 (AACCI, 2000). Se pesaron 1 g de muestra en charolas de aluminio (puestas previamente a masa constante), se colocaron en la estufa al vacío a 0.2030 psi (Shel Lab, Mod. 1425; Cornelius, USA) a 65 °C hasta alcanzar masa constante (aproximadamente 6 h). Posteriormente se atemperaron en un desecador por 20 min. Finalmente se pesaron en balanza analítica (Ohaus, Mod. PA224C; Cornelius, USA) y se determinó el porcentaje de humedad en base seca (H bs) por diferencia de peso de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$H\ bs\ (\%) = \frac{Muestra\ húmeda\ (g) - Muestra\ seca\ (g)}{Muestra\ seca\ (g)} \cdot 100 \quad (1)$$

### 5.7.2 Proteínas

La determinación del contenido de proteínas se realizó de acuerdo con el método 46-13.01 (AACCI, 2000), que cuantifica el nitrógeno libre mediante el método Kjeldahl. Se pesaron 0.25 g de muestra y se le adicionaron 2 g de sulfato de cobre, 10 g de sulfato de sodio anhidro y 5 mL de ácido sulfúrico. El matraz se colocó en el digestor Micro Kjeldahl de bloques (Prendo, Mod. DIK-40; Puebla, México) y se calentó gradualmente hasta alcanzar 400 °C, la temperatura se mantuvo durante 1.5 h, tiempo suficiente para que todo el material se carbonizara y se lograra observar que el contenido del matraz presentara un color verde claro. Posteriormente, se dejaron enfriar las muestras hasta alcanzar temperatura ambiente (25 °C). Posteriormente se colocaron uno a uno en el destilador Micro kjeldahl (Prendo, Mod. DEK-1; Puebla, México) y se adicionaron 21 mL de agua destilada para disolver completamente el residuo del matraz y 15 mL de solución de hidróxido de sodio al 60 % (p/v). El destilado se recibió en un matraz Erlenmeyer que contenía 12 mL de ácido bórico al 4%, y 2 gotas de indicador de Wesslow. Se destiló hasta recolectar 50 mL aproximadamente y se retiró el matraz para finalmente titular con ácido clorhídrico 0.1 N

hasta obtener un viraje a color violeta. El contenido de proteínas se estimó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Proteínas}(\%) = \frac{(\text{mL de HCl gastados})(N \text{ del HCl})(0.014)}{\text{Sólidos secos de la muestra (g)}} \cdot F \cdot 100 \quad (2)$$

Donde  $N$  es la normalidad y  $F$  el factor de proteína de 6.25 para la conversión al contenido proteico.

### 5.7.3 Lípidos

El contenido de lípidos se determinó de acuerdo con el método 30-25.01 (AACCI, 2000) utilizando el equipo de extracción Soxhlet. En un cartucho de papel filtro se colocó 1 g de la muestra y se sometió a la extracción con 100 mL de éter de petróleo contenidos en un matraz bola llevado a masa constante previamente. La extracción se realizó por un periodo de 5 h a una potencia de calentamiento suficiente para conseguir 6 recirculaciones por h. Transcurrido el tiempo de extracción, los matraces se dejaron secar en estufa a 65 °C hasta alcanzar masa constante. Finalmente, el porcentaje de lípidos se estimó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Lípidos}(\%) = \frac{\text{Peso final del matraz (g)} - \text{Peso inicial del matraz (g)}}{\text{Sólidos secos de la muestra (g)}} \cdot 100 \quad (3)$$

### 5.7.4 Cenizas

El contenido de cenizas se determinó de acuerdo con el método 08-01.01 (AACC, 2000). Las muestras se colocaron en crisoles previamente llevados a masa constante, y se calcinaron en su totalidad en una parrilla (Prendo, Mod. PCA-1500, Puebla, México). Posteriormente, las muestras calcinadas se introdujeron en una mufla (Wise Therm, mod. FH-14, Alemania) a 550 °C durante 5 h. Las muestras fueron retiradas 24 h después y se colocaron en un desecador para atemperarlas y finalmente pesarlas en una balanza analítica (Ohaus, Mod. AR2140, Nueva Jersey, USA). El porcentaje de cenizas se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Cenizas}(\%) = \frac{\text{Peso final del crisol (g)} - \text{peso inicial del crisol (g)}}{\text{Sólidos secos de la muestra (g)}} \cdot 100 \quad (4)$$

## **5.8 Análisis reológicos**

### **5.8.1 Perfil de viscosidad**

Los perfiles de viscosidad de la harina, del almidón nativo y del almidón resistente tipo IV se analizaron en un reómetro (TA Instruments, Discovery HR-2 Hybrid) equipado con una celda de viscosidad de almidón (Smart Swap™, SPC 110533) de acuerdo con Ramírez-Hernández et al., (2020) con ligeras modificaciones. Se utilizaron tres ciclos de barrido (calentamiento-isoterma-enfriamiento). La temperatura se acondicionó por 60 s a 25 °C y se aumentó a 15 °C·min<sup>-1</sup> hasta 90 °C, donde se mantuvo por 360 s y luego se dejó enfriar hasta 25 °C a 30 °C·min<sup>-1</sup>. Para la obtención de los resultados se utilizó el software Trios versión 4 (TA Instruments). Las pruebas se realizaron por triplicado.

### **5.8.2 Viscoelastacidad**

La evaluación de viscoelasticidad se efectuó utilizando un reómetro (TA Instruments, Discovery HR-2 Hybrid) equipado con una geometría de placa plana (Smart Swap™, SST ST 40 mm Sandblasted Plate). Las muestras se cargaron en el centro de la celda de calentamiento y se dejaron equilibrar durante 5 min a 25 °C. Los experimentos se realizaron utilizando dos pasos de mediciones reológicas: (1) barridos de deformación y (2) barridos de frecuencia. Los barridos de deformación (0.1 a 100 %) de las muestras se evaluaron a 25 °C, y una frecuencia constante de 0.1 Hz. Estos experimentos se realizaron para determinar la máxima deformación alcanzable por todas las muestras en la región viscoelástica lineal (RVL). Los barridos de frecuencia de las muestras se evaluaron a 25 °C. Los resultados obtenidos se caracterizarán por G' y G'' en función de la frecuencia en el rango de 0.01 a 100 Hz, a una deformación constante (determinada de acuerdo con los resultados). Las pruebas se realizaron por triplicado.

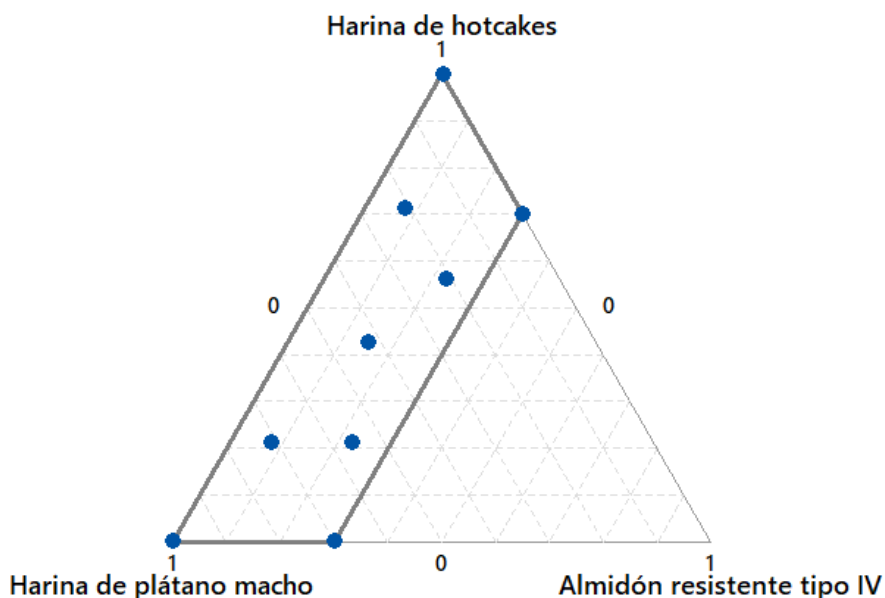
## **5.9 Diseño experimental y análisis estadístico**

Para evaluar la sustitución de la harina de hotcakes por harina de plátano macho (valor máximo de sustitución: 100%) y almidón resistente tipo IV (valor máximo de sustitución: 30%) se propuso un diseño experimental de mezclas simplex, los porcentajes de sustitución

se presentan en la Tabla 5.2 y el gráfico del diseño experimental se muestra en la Figura 5.2.

**Tabla 5.2** Diseño experimental de mezcla simplex utilizado para la formulación de hotcakes funcionalizados con harina de plátano macho y almidón resistente tipo IV.

No. de tratamiento	Porcentajes de sustitución		
	Harina de plátano macho	Almidón resistente tipo IV	Harina de hotcakes
1	0.00	0.00	100.00
2	100.00	0.00	0.00
3	0.00	30.00	70.00
4	70.00	30.00	0.00
5	42.50	15.00	42.50
6	71.25	7.50	21.25
7	56.25	22.50	21.25
8	21.25	7.50	71.25
9	21.25	22.50	56.25



**Figura 5.2** Gráfica de diseño experimental de mezclas simplex utilizado para la formulación de hotcakes funcionalizados con harina y almidón resistente tipo IV de plátano macho.

Los resultados de la química proximal se reportaron como la media  $\pm$  desviación estándar, y el análisis estadístico se realizó mediante ANOVA seguido de la prueba de pares de Tukey. Las diferencias se consideraron estadísticamente significativas a un valor de probabilidad inferior al 5 % ( $p < 0.05$ ).

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La materia prima que se utilizó fue plátano variedad macho en estado verde o inmaduro. Para obtener la harina se procesaron 14.84 kg de pulpa de plátano macho en estado inmaduro, de los cuales se obtuvieron 6.12 kg de harina, es decir, se obtuvo un rendimiento de 41.23%. En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos de (1) la caracterización de las propiedades proximales, y perfil de viscosidad de dispersiones acuosas de la harina de plátano macho, de su almidón nativo y del almidón resistente tipo IV desarrollado; (2) la evaluación del efecto de la adición de la harina de plátano macho y del almidón resistente tipo IV sobre las propiedades reológicas de las pastas para hotcakes; y (3) la caracterización proximal de los hotcakes desarrollados a partir de harina de plátano macho, y del almidón resistente tipo IV.

### 6.1 Análisis químico proximal de harina de plátano macho, almidón nativo y almidón resistente tipo IV

En la Tabla 6.1 se presentan los valores obtenidos para el análisis químico proximal de la harina de plátano macho verde o inmaduro (HPV), almidón nativo de plátano macho (AN) y del almidón resistente tipo IV desarrollado a partir del AN.

**Tabla 6.1** Composición química proximal de harina de plátano macho, almidón nativo y almidón resistente tipo IV.

Fuente	Humedad (g/100 g s.s.)	Lípidos (g/100 g s.s.)	Cenizas (g/100 g s.s.)	Proteínas (g/100 g s.s.)
Harina de plátano macho	2.28 ± 0.35 <sup>c</sup>	2.09 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.42 ± 0.07 <sup>a</sup>	3.39 ± 0.28 <sup>a</sup>
Almidón nativo	9.23 ± 0.53 <sup>a</sup>	2.20 ± 0.24 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.08 <sup>c</sup>	1.60 ± 0.10 <sup>b</sup>
Almidón resistente	7.21 ± 0.12 <sup>b</sup>	1.65 ± 0.38 <sup>b</sup>	0.73 ± 0.09 <sup>b</sup>	0.48 ± 0.01 <sup>c</sup>

Los valores se reportan como la media ± desviación estándar (n = 2). En la misma columna, los valores que comparten letra no presentan diferencias significativas (p < 0.05)

La humedad de las harinas es un factor clave para garantizar su estabilidad fisicoquímica durante su almacenamiento, en general las harinas presentan humedades cercanas al 14-14.5 % bh, teniendo como límite máximo 15 %. Por debajo de este valor se garantiza una prolongada vida útil de los alimentos, debido a que no existe proliferación de microorganismos, que en muchos casos alteran la vida útil de los alimentos, como las harinas. Los productos estudiados en el presente trabajo (Tabla 6.1) presentaron contenidos de humedad menor al 10%, lo que garantiza la estabilidad de los productos y podrían clasificarse como microbiológicamente seguros y podrían almacenarse a largo plazo (Tontul y Topuz, 2017). Montoya *et al.*, (2014) reportaron un valor de 9.45% H bh para harina plátano macho, y para la harina de yuca de 8.5% H bh. Encarnación y Salinas, (2017) reportaron 10.40 % H bh para harina de plátano. Todos los valores están por arriba de lo reportado en el presente trabajo para HPV. Estas diferencias en el contenido de humedad pueden ser debido al método y condiciones de secado.

Para el contenido de lípidos Montoya *et al.*, (2014) reportaron un valor de 2.45% bh para la harina de plátano, un valor similar a lo reportado por Soto (2010), y ambos valores se encuentran por arriba de las harinas obtenidas en este trabajo. Montoya *et al.*, (2014) reportaron un valor para las proteínas de la harina de plátano macho de 3.32% bh y para la harina de yuca de 4%, ambos valores están próximos a la cantidad de proteína reportada para HPV en este trabajo. Pero una vez que se aisló el AN a partir de HPV, como se esperaba, se observó una disminución de proteína. Y una vez que se modificó químicamente el AN para obtener AR, se observó una disminución en el contenido tanto de lípidos como de proteínas. Lo anterior se atribuye a que el entrecruzamiento químico se llevó en fase acuosa a una temperatura de 45 °C por 3 h, lo que puede favorecer la lixiviación de ambos componentes.

Aparicio-Saguilán *et al.*, (2006) reportan que almidones nativos con valores mayores al 1% en lípidos puede afectar la temperatura de gelatinización del almidón o las propiedades de formación de pastas, debido a la formación de complejos de amilosa-lípidos. Por otra parte, la presencia de una fracción proteica importante en almidones representa un agente de unión para generar agregados esféricos que actúan finalmente como cápsulas (Gonzalez-Soto *et al.*, 2011). Por lo tanto, el AN obtenido en este trabajo podría destinarse a encapsulación mediante secado por aspersion.

Respecto al contenido de cenizas Montoya *et al.*, (2014) reportaron un valor de cenizas para harina de plátano macho verde de 2.10%, un valor similar a lo obtenido para HPV en

este trabajo. Pero una vez se aisló el AN, el valor de cenizas disminuyó a 0.03% bs, debido al proceso de extracción/separación acuosa que se realizó para recuperar el AN a partir de HPV. El contenido de cenizas para almidón de plátano de la variedad FHIA 20 cultivada en Colombia (0.29% bs) (Chávez-Salazar *et al.*, 2017)) y para maíz blanco, azul e híbrido (0.1%) (Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2019), fue mayor a lo obtenido en el presente trabajo para AN. Bustillos-Rodríguez *et al.*, (2019) atribuyen que la presencia de minerales en el almidón está relacionada con el aumento de la claridad y la viscosidad de la pasta. Sin embargo, después del entrecruzamiento químico del AN para obtener el AR, se observó un incremento en las cenizas, debido a la incorporación de grupos fosfatos en la estructura del almidón.

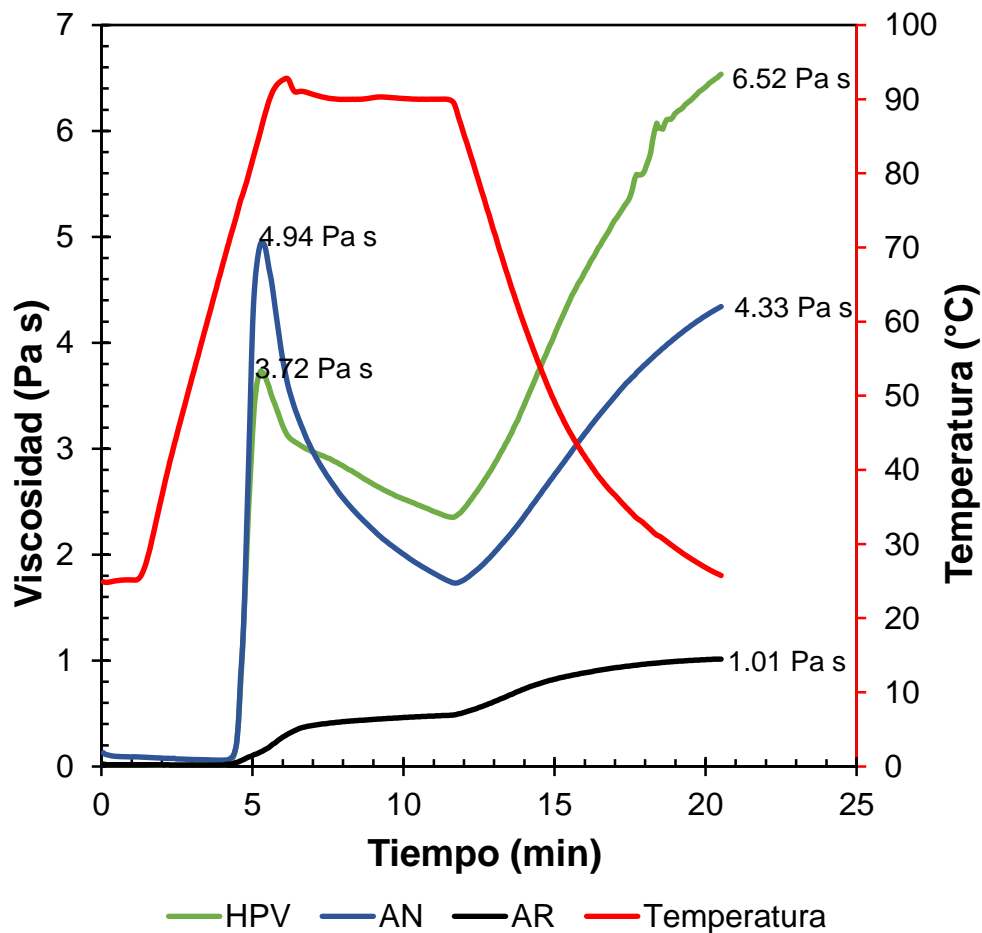
Es de suma importancia tener en cuenta que los contenidos de proteína, lípidos y minerales obtenidos en los productos de la Tabla 6.1 son aceptables para desarrollar productos alimenticios que presenten un buen aporte nutricional; la HPV podría ser usada para la elaboración de harinas combinadas, sopas, y en la fabricación de galletas. También es importante señalar que Flores-Gorosquera *et al.*, (2004) propuso el aislamiento de AN a partir de una molienda húmeda seguida del tamizado por diferentes mallas del producto molido, mientras que en el presente proyecto se propuso una secuencia de secado-molienda en seco-tamizado; y por análisis químico proximal se demuestra que se logró una separación eficiente de minerales y proteínas, por lo que podría ahorrarse una cantidad significativa de agua con la presente propuesta. Un análisis del contenido de almidón total sería necesario para confirmar la eficiencia de aislamiento obtenida en el presente trabajo.

## **6.2 Perfil de viscosidad de dispersiones acuosas de harina de plátano macho, almidón nativo y almidón resistente tipo IV**

Cuando se realiza una dispersión de almidón en agua y se somete a calentamiento, los gránulos de almidón empiezan a hincharse, lo cual produce un incremento de la viscosidad. Obteniendo un pico de viscosidad máxima, debido al hinchamiento máximo del gránulo antes de su rompimiento físico. En la etapa de enfriamiento se obtiene otro pico de viscosidad (viscosidad final) debido a la reorganización de las cadenas principalmente de la amilosa (Rangel-Cortez *et al.*, 2017). La transición de orden-desorden que sufren los gránulos de almidón durante este proceso tiene gran impacto en el procesamiento, calidad y estabilidad de los productos basados en almidón (Pineda-Gómez *et al.*, 2010). En las siguientes líneas se reportan y discuten los resultados obtenidos sobre el perfil de

viscosidad de dispersiones acuosas de harina de plátano macho verde o inmaduro (HPV), almidón nativo de plátano macho (AN), y almidón resistente tipo IV (AR).

En el ámbito de la alimentación ha surgido el interés de desarrollar harinas de distintas fuentes no convencionales de almidón para la elaboración de nuevos productos alimenticios. Dichas harinas son una excelente alternativa debido a que, además de ofrecer grandes beneficios de conservación y transformación, también aportan grandes posibilidades gastronómicas (Melrose, Perroy, & Careas, 2007). Pero para comprender el impacto de su adición deben caracterizarse sus propiedades funcionales, por ejemplo, su perfil de viscosidad (Holst & Williamson, 2008). En la Figura 6.1 se muestran los resultados obtenidos sobre el perfil de viscosidad de dispersiones acuosas de HPV, AN, y AR.



**Figura 6.1** Perfil de viscosidad de dispersiones acuosas (10% m/m) de harina de plátano macho verde (HPV), de almidón nativo de plátano macho (AN) y de almidón resistente tipo IV (AR).

Los perfiles de viscosidad de HPV y AN presentaron un comportamiento típico de almidones, esto es un incremento en la viscosidad con el incremento de la temperatura, una disminución en la viscosidad durante un proceso de cocción (en este caso a 90 °C), y un incremento en la viscosidad después de enfriarse/atemperarse (Figura 6.1). Esto nos indica que los gránulos de almidón se hincharon hasta que lograron romperse a una temperatura cercana a 90°C. La amilopectina es la principal responsable del hinchamiento y viscosidad de la pasta del almidón (Tester & Morrison, 1990). Mientras que el comportamiento de la viscosidad final se asocia con el contenido amilosa, debido a que después de la ruptura logra lixiviarse y forma redes con el agua. Sin embargo, los perfiles de HPV y AN son distintos entre sí, se observa por ejemplo que en el primer incremento de viscosidad (viscosidad máxima), el AN supera al HPV, lo cual podría asociarse a la presencia de otros componentes en la HPV como las proteínas y los minerales, lo cual concuerda con la composición química proximal de ambos productos (Tabla 6.1).

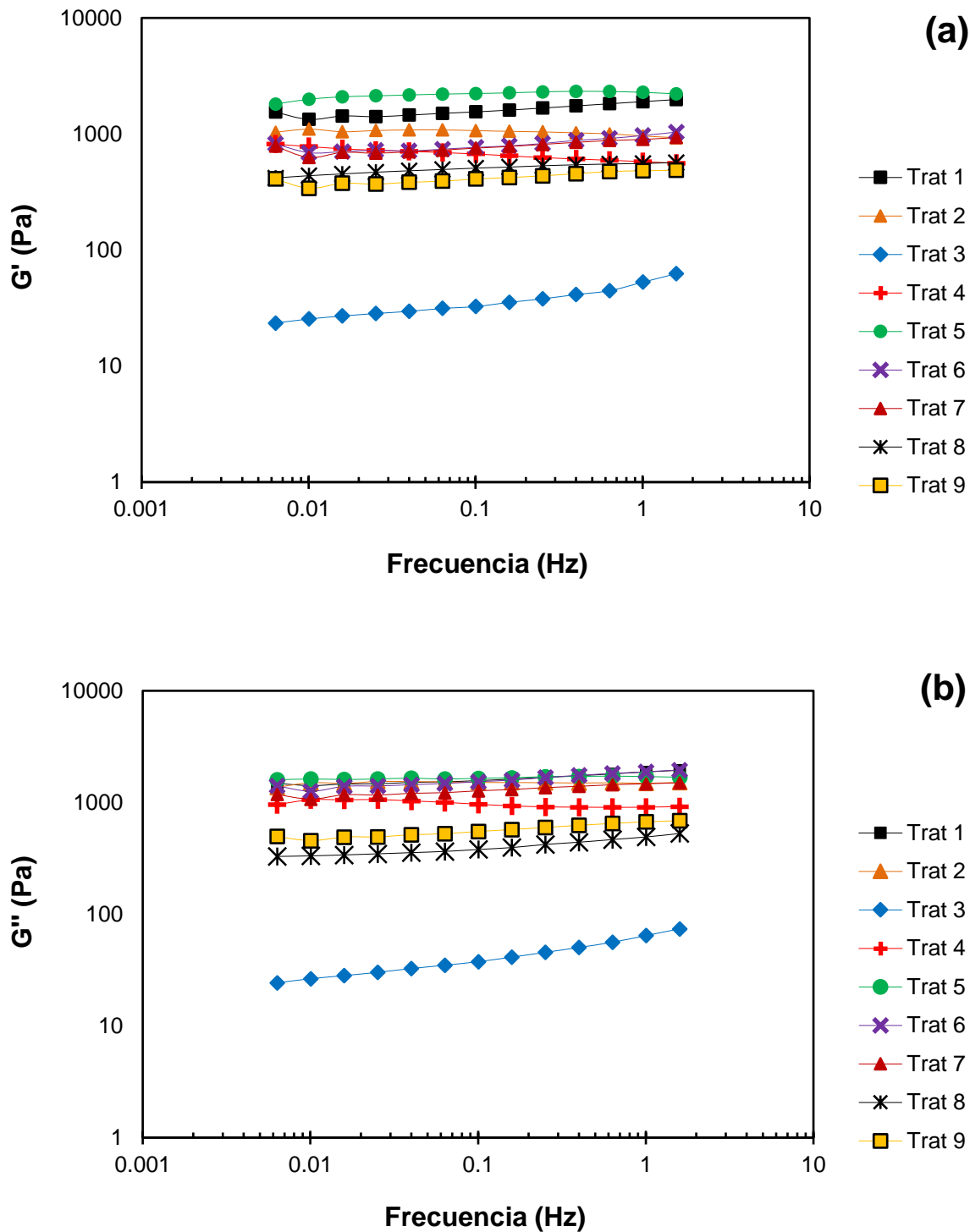
Por otra parte, el perfil de viscosidad del AR no registró un comportamiento típico de almidones, esto es debido a que durante la modificación química hay un rompimiento de la estructura granular del almidón y un entrecruzamiento químico con grupos fosfatos, impidiendo que el gránulo interactúe con el agua (Aparicio-Saguilán, 2008). Por lo tanto, con esta prueba se demuestra que en el presente trabajo logró desarrollarse AR a partir del almidón de plátano macho verde. Más pruebas son necesarias para corroborar esto con mayor certeza, por ejemplo, determinar el contenido de almidón resistente, el cual debería incrementar en AR con respecto a AN y HPV.

### **6.3 Propiedades viscoelásticas de pastas de hotcakes formuladas con harina de plátano verde y almidón resistente tipo IV**

Una vez que se demostró que por entrecruzamiento químico se obtuvo almidón resistente tipo IV a partir del AN de plátano macho verde, se procedió a preparar las distintas formulaciones de hotcakes enriquecidas con AR y HPV de acuerdo con el diseño experimental propuesto en la Tabla 5.2. Es importante señalar que de acuerdo con pruebas preliminares se decidió adicionar 6% (m/m) de polvo para hornear (Royal®) con respecto a la masa adicionada de HP y AR. Por ejemplo, para el tratamiento 2 la formulación corresponde a un 100% de sustitución de la harina convencional de hotcakes por HPV, así que se adicionaron 188 g de HPV (94% m/m) y 12 g de polvo para hornear (6% m/m).

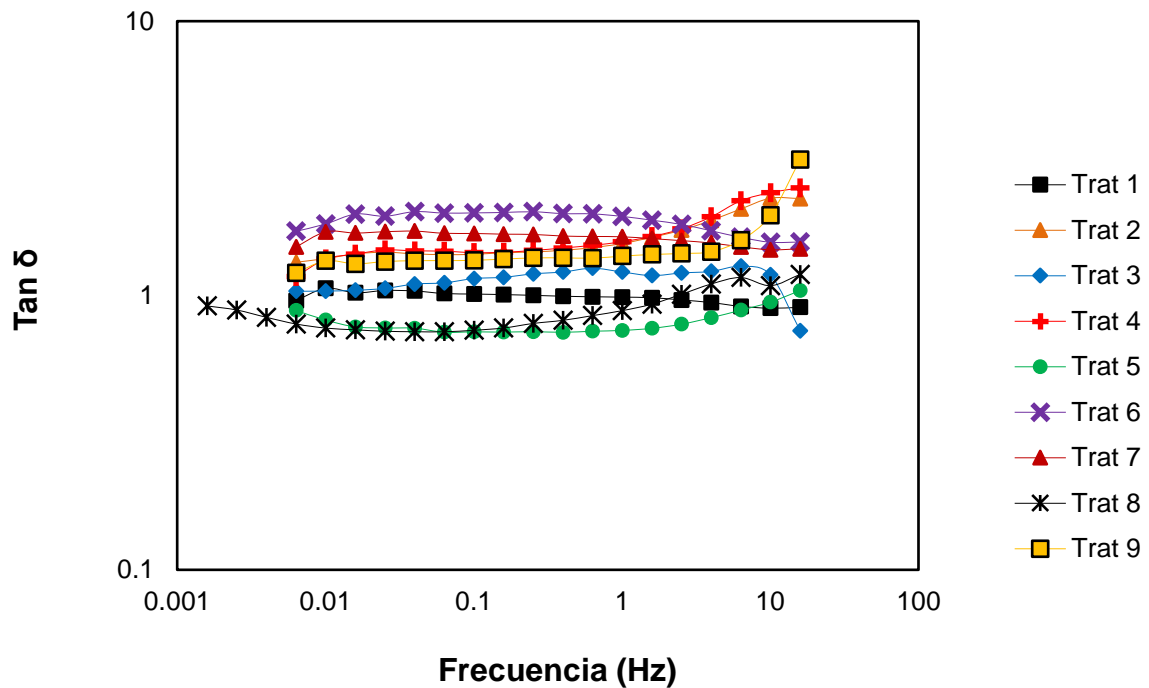
Los resultados obtenidos de las pruebas de viscoelasticidad realizadas a las pastas para hotcakes obtenidas se caracterizaron por  $G'$  y  $G''$ . Donde,  $G'$  corresponde al módulo elástico o de almacenamiento, relacionado con la respuesta del material como un sólido y  $G''$  corresponde al módulo viscoso o de pérdida, relacionado con la respuesta del material como un fluido. De acuerdo con los barridos de deformación realizados a 25 °C del módulo elástico  $G'$  y del módulo viscoso  $G''$  de pastas para hotcakes enriquecidas con HPV y AR, se observó que a un porcentaje de deformación mayor a 0.5 % la pasta tiende a destruirse (datos no reportados), es decir, por debajo de ese valor se mantiene la región viscoelástica lineal, por lo que se consideró 0.3% de deformación para realizar los barridos de frecuencia. En la Figura 6.2. se presentan los barridos de frecuencia a 25 °C del módulo elástico  $G'$  y del módulo viscoso  $G''$  de pastas para hotcakes enriquecidas con HPV y AR.

Se observó en la Figura 6.2(a) que el módulo  $G'$  de los tratamientos 5, 1, y 2 fue mayor que el resto de los tratamientos. Estos tratamientos son los que poseen partes iguales de HPV y harina convencional de hotcakes (HC) (tratamiento 5), 100 % de HC (tratamiento 1), y 100% de HPV (tratamiento 2). Mientras que el tratamiento 3 expresó el menor valor de  $G'$  y de  $G''$  (Figura 6.2), y dicho tratamiento contiene el mayor porcentaje de sustitución de AR (30%). Esto refleja el efecto significativo de la adición de AR sobre el perfil viscoelástico de las pastas para hotcakes. Estos resultados sugieren que el AR representa una fracción que no forma geles y en consecuencia reduce el comportamiento viscoelástico de la mezcla para hotcakes, esto es congruente con los resultados obtenidos en los perfiles de viscosidad de las dispersiones acuosas de HPV y AR (ver Figura 6.1).



**Figura 6.2** Barridos de frecuencia a 25 °C del módulo elástico  $G'$  (a) y del módulo viscoso  $G''$  (b) de pastas para hotcakes enriquecidas con harina de plátano macho verde (HPV) y almidón resistente tipo IV (AR). Ver formulaciones de sustitución en Tabla 5.2.

Los resultados de  $\text{Tan } \delta$  (relación  $G''/G'$ ) se muestran en la Figura 6.3 para pastas de hotcakes enriquecidas con HPV y AR.

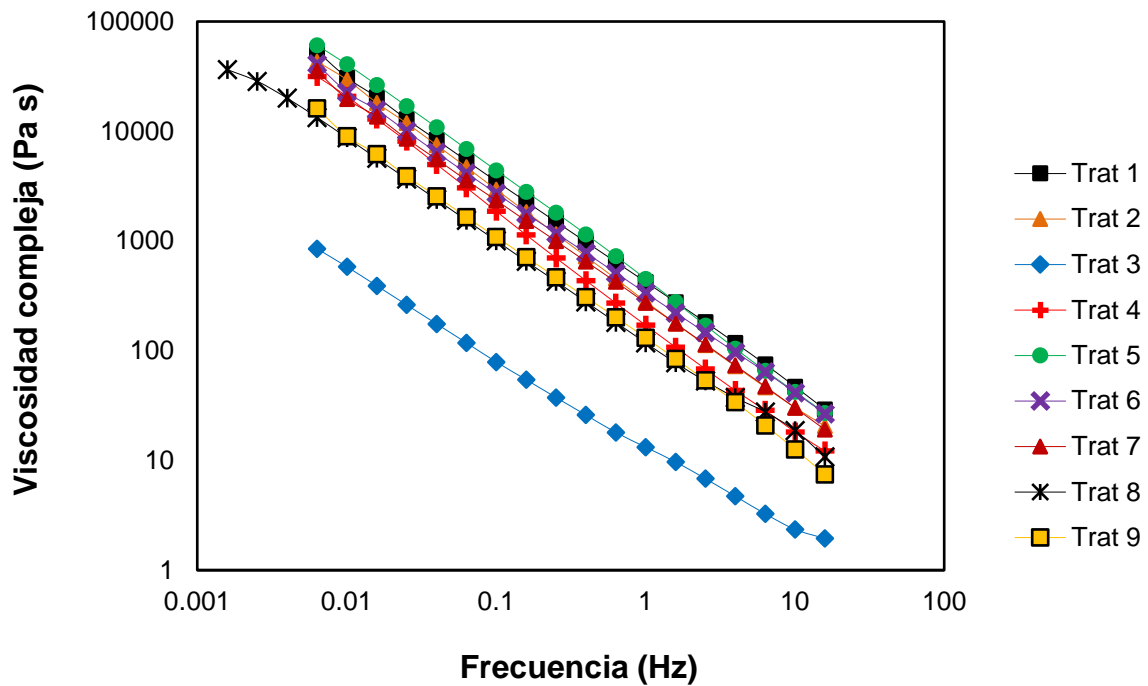


**Figura 6.3**  $\text{Tan } \delta$  a 25 °C de pastas para hotcakes enriquecidas con harina de plátano macho verde (HPV) y almidón resistente tipo IV (AR). Ver formulaciones de sustitución en Tabla 5.2.

Se puede observar en la Figura 6.3 que las muestras de pastas para hotcakes, a excepción de los tratamientos 8 y 5, mostraron valores de  $\text{Tan } \delta$  superiores a 1, es decir que  $G''$  presenta valores mayores que  $G'$ , indicando así que dichos tratamientos presentan geles con carácter predominantemente viscosos. Además mostraron poca dependencia con la frecuencia, por lo que podrían considerarse mezclas rígidas. Se ha reportado que las propiedades reológicas son influenciadas por diversos factores, como la estructura granular del almidón presente en las mezclas (Ortega-Ojeda *et al.*, 2003), las características estructurales y la proporción de amilosa/amilopeptina del almidón (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2006), y la presencia de otros componentes como lípidos, proteínas, minerales y azúcares.

La viscosidad compleja a 25 °C para pastas de hotcakes enriquecidas con HPV y AR se muestra en la Figura 6.4. Como se puede observar, todos los tratamientos en el presente trabajo mostraron actividad no newtoniana y respuesta reofluidizante (pseudoplástica), en otras palabras, cuando se les aplica una fuerza se modifican sus propiedades reológicas.

Esto tecnológicamente representa una ventaja pues pueden fluir libremente con poco esfuerzo y dosificarse fácilmente durante la etapa de cocción. Cabe resaltar que la mayoría de los tratamientos propuestos presentaron valores de viscosidad compleja similares al tratamiento 1 (testigo), a excepción del tratamiento 3, el cual como se ha discutido contiene una sustitución mayor de AR (30%) y justifica el fenómeno observado.



**Figura 6.4** Viscosidad compleja a 25 °C de pastas para hotcakes enriquecidas con harina de plátano macho verde (HPV) y almidón resistente tipo IV (AR). Ver formulaciones de sustitución en Tabla 5.2.

#### 6.4 Análisis químico proximal de hotcakes enriquecidos con almidón resistente tipo IV

Después de evaluar las propiedades reológicas de las pastas y verificar que poseen un comportamiento similar a una pasta convencional de hotcakes, se procedió a la cocción de cada una. En la Tabla 6.2 se muestran los hotcakes obtenidos en el presente trabajo a partir de las formulaciones propuestas que contemplan la sustitución de harina de hotcakes por HPV y AR.

Los hotcakes se encuentran dentro de la categoría de productos de panificación y pastelería, los cuales se caracterizan por utilizar como materia prima a la harina de trigo, siendo un limitante de consumo para las personas intolerantes al gluten. En el presente trabajo se evaluó la viabilidad de sustituir la harina de hotcakes (basada en trigo) en diferentes proporciones por harina de plátano macho verde, y la adición de almidón resistente tipo IV. Como se observa en la Tabla 6.2, el proceso de cocción de los distintos tratamientos resultó en productos con apariencia física similar al tratamiento testigo (Tratamiento 1).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) define a las harinas compuestas como mezclas elaboradas a base de otros cereales diferentes al trigo para producir alimentos como pan, pastas, galletas, etc. Por lo tanto, las bases de los hotcakes desarrollados en el presente trabajo podrían definirse como harinas compuestas (desde tratamiento 2 a 9). Es importante destacar que los productos que se desarrollaron con las formulaciones 2 y 4 no contienen gluten, pues el tratamiento 2 está basado en una sustitución al 100% de la HC por HPV, y el tratamiento 4 sustituye a HC por una mezcla de HPV-AR (70:30 m:m) (ver Tabla 6.2); por lo que ambos tratamientos son una buena alternativa de alimentos saludables para personas celiacas. Otras pruebas son necesarias para definir su aceptación comercial, por ejemplo determinación de color, evaluación sensorial y evaluación de la textura de los productos obtenidos.

**Tabla 6.2** Hotcakes desarrollados en el presente trabajo enriquecidos con harina de plátano verde y almidón resistente tipo IV.










Trat	Porcentajes de sustitución			Hotcakes	Trat	Porcentajes de sustitución			Hotcakes
	HP	AR	HC			HP	AR	HC	
1	0.00	0.00	100.0		4	70.00	30.00	0.00	
2	100.0	0.00	0.00		5	42.50	15.00	42.50	
3	0.00	30.00	70.00		6	71.25	7.50	21.25	

Tabla 6.2 Continúa.

Trat	Porcentajes de sustitución			Hotcakes
	HP	AR	HC	
7	56.25	22.50	21.25	
8	21.25	7.50	71.25	
9	21.25	2.25	56.25	

La composición química proximal de las formulaciones de hotcakes desarrolladas en el presente trabajo se reporta en la Tabla 6.3. Es importante señalar que primeramente se llevaron a sequedad los productos obtenidos para poder almacenarlos y hacer los análisis correspondientes. Por esta razón, se reportan humedades desde 2.28 g/100 g bs hasta 3.77 g/100 g bs. Las diferencias en los valores de humedad pueden asociarse a las diferencias en las propiedades psicrométricas del aire utilizado para secar, pues fueron secados en diferentes días según se fueron preparando. El secado se realizó a 55 °C y 1.5 m/s hasta masa constante (aproximadamente 8 h).

**Tabla 6.3** Composición química proximal de diferentes formulaciones de hotcakes desarrolladas en el presente trabajo.

Trat	Porcentajes de sustitución			Componentes (g/100 g bs)			
	HP	AR	HC	Humedad	Lípidos	Proteínas	Cenizas
1	0.00	0.00	100.00	2.60 ± 0.06 <sup>c</sup>	5.05 ± 0.01 <sup>c</sup>	5.30 ± 0.08 <sup>c</sup>	4.09 ± 0.00 <sup>d</sup>
2	100.00	0.00	0.00	2.76 ± 0.15 <sup>bc</sup>	5.11 ± 0.01 <sup>c</sup>	5.10 ± 0.08 <sup>c</sup>	5.09 ± 0.00 <sup>b</sup>
3	0.00	30.00	70.00	3.24 ± 0.06 <sup>b</sup>	5.56 ± 0.04 <sup>b</sup>	6.94 ± 0.00 <sup>a</sup>	4.59 ± 0.14 <sup>c</sup>
4	70.00	30.00	0.00	2.28 ± 0.07 <sup>cd</sup>	5.10 ± 0.02 <sup>c</sup>	6.48 ± 0.17 <sup>b</sup>	5.38 ± 0.00 <sup>a</sup>
5	42.50	15.00	42.50	2.44 ± 0.29 <sup>c</sup>	7.24 ± 0.20 <sup>a</sup>	6.84 ± 0.17 <sup>a</sup>	4.38 ± 0.12 <sup>c</sup>
6	71.25	7.50	21.25	3.77 ± 0.07 <sup>a</sup>	5.06 ± 0.04 <sup>c</sup>	4.68 ± 0.17 <sup>d</sup>	4.94 ± 0.07 <sup>bc</sup>
7	56.25	22.50	21.25	2.38 ± 0.23 <sup>c</sup>	7.37 ± 0.02 <sup>a</sup>	4.68 ± 0.17 <sup>d</sup>	4.79 ± 0.14 <sup>c</sup>
8	21.25	7.50	71.25	2.35 ± 0.03 <sup>c</sup>	5.34 ± 0.02 <sup>bc</sup>	6.42 ± 0.08 <sup>b</sup>	4.29 ± 0.14 <sup>c</sup>
9	21.25	2.25	56.25	2.55 ± 0.44 <sup>c</sup>	7.27 ± 0.02 <sup>a</sup>	6.84 ± 0.17 <sup>a</sup>	5.13 ± 0.07 <sup>b</sup>

Los valores se reportan como la media ± desviación estándar (n = 2). En la misma columna, los valores que comparten letra no presentan diferencias significativas (p < 0.05)

Independientemente del secado realizado, es posible evaluar el impacto de la adición de HPV y AR sobre el contenido de lípidos, proteínas y cenizas, pues están estimados en base seca, es decir, están expresados los valores en función de una fracción másica constante en el sistema bajo estudio.

De acuerdo con la información técnica de la harina comercial para hotcakes que se utilizó (Pronto®), esta contiene 2.65 g/100 g de lípidos, mientras que el contenido de lípidos en el producto obtenido con el tratamiento testigo (Trat 1, ver Tabla 6.3) fue de 5.05 % bs. El aumento de lípidos en el producto final se debe a la adición de leche y huevo en la formulación. La mayoría de los tratamientos no mostró diferencia significativa en lípidos en comparación con el tratamiento testigo, a excepción de los tratamientos 3, 5, 7 y 9. Sin embargo, estas diferencias no pueden asociarse a la adición de HPV y AR, porque tienen un porcentaje de lípidos (1.65-2.20 g/100 g bs) por debajo a lo reportado para la HC utilizada. Las diferencias podrían estar asociadas a las otras materias primas utilizadas, principalmente el huevo.

En cuanto a proteínas, no se observaron diferencias significativas entre los productos obtenidos con HC (Tratamiento 1) y HPV (Tratamiento 2). Mientras que la tendencia del resto de formulaciones fue de alcanzar mayor contenido de proteínas. Sin embargo, el AR

no representa una fuente significativa de proteínas como se observó en la Tabla 6.1, por lo tanto, las diferencias observadas pueden atribuirse a diferencias en el resto de materias primas.

Finalmente, todos los tratamientos distintos al testigo expresaron mayor contenido de cenizas, alcanzando el mayor valor en el tratamiento 4, cuya formulación sustituye completamente a la HC por una mezcla de HPV-AR (70:30 m:m). Así que el aporte de minerales de estas dos materias primas resulta significativa.

## 7 CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis químico proximal y la determinación del perfil de viscosidad realizados a la HPV y al AN, se demostró que fue posible aislar almidón a partir de harina de plátano macho verde, sin requerir un proceso de molienda en húmedo con el consecuente tamizado del producto húmedo. Esto representa un ahorro importante de agua en comparación con la propuesta de Flores-Gorosquera *et al.*, (2004).

El proceso de entrecruzamiento químico realizado sobre el almidón nativo de plátano macho verde permitió modificarlo y obtener en consecuencia almidón resistente tipo IV, esto de acuerdo con los resultados obtenidos por análisis del perfil de viscosidad realizados sobre dispersiones acuosas de AN y AR.

La sustitución de harina comercial de hotcakes por HPV y AR modificó las propiedades reológicas (viscoelasticidad y viscosidad compleja) de las pastas obtenidas con las distintas formulaciones propuestas en el presente trabajo, específicamente el incremento en el contenido de AR disminuyó los valores de las propiedades reológicas evaluadas. Sin embargo, tecnológicamente las pastas pudieron manipularse fácilmente para proceder con el proceso de cocción. Así mismo, se modificó la composición química proximal de las formulaciones de sustitución, siendo el contenido de cenizas el principal indicador del enriquecimiento con HPV y AR, incrementando los valores con la presencia de estos.

En el presente trabajo se consiguió producir hotcakes utilizando HPV y AR desarrollado a partir del almidón nativo de HPV. Todas las formulaciones propuestas fueron tecnológicamente factibles, inclusive, dos de las formulaciones fueron libres de gluten.

## PERSPECTIVAS

Realizar otros análisis para demostrar que el aislamiento del almidón a partir de HPV se realizó de manera eficiente, por ejemplo, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, cuantificación de almidón total.

Confirmar con otros análisis que se produjo de forma eficiente el almidón resistente tipo IV, por ejemplo, cuantificación de almidón resistente en HPV, AN y en el AR desarrollado.

Darle seguimiento al proceso de elaboración de una galleta basada en las formulaciones propuestas. Esta idea surgió tras el horneado de los hotcakes los cuales fueron sometidos a un proceso de secado, para posteriormente así realizarle los análisis correspondientes al producto seco y molido. Una vez deshidratados los hotcakes presentaron una consistencia similar a la de una galleta por lo que sugiere la viabilidad de explorar este tipo de producto en trabajos futuros. Además, se considera la posibilidad de agregar otros componentes para mejorar sus características sensoriales, que hagan de esta galleta un alimento nutritivo y aceptable por el público consumidor. Se propone realizar pruebas de digestión *in vitro*, tales como la velocidad de hidrólisis del almidón y la determinación del índice glucémico, para evaluar las propiedades funcionales de las galletas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AACCI. (2000). *Approved Methods of Analysis* (10th ed.). St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists International.

Aparicio, A. (2007). *Obtención de almidón resistente por tratamiento de autoclave a partir de almidón de plátano modificado: Caracterización fisicoquímica, morfológica y estructural* (Tesis). Instituto Politécnico Nacional de Desarrollo de Productos Bióticos. 117p.

Barrantes Rodríguez, R. *Elaboración de un fetuccini a partir de plátano (Musa AAB cultivar Cemsa 3/4) Determinación de la concentración de almidón resistente, disponible y total durante su proceso de elaboración, evaluación de agrado, parámetros de textura relacionados con calidad y contenido de fibra dietética del producto final.*

Barros, J.H.T., Telis, V.R.N., Taboga, S. et al. Almidón resistente: efecto sobre la reología, la calidad y la tasa de envejecimiento del pan de trigo blanco. *J Food Sci Technol* **55**, 4578–4588 (2018).

Bustillos-Rodríguez, JC., Tirado-Gallegos, JM., Ordóñez-García, M., Zamudio-Flores, PB., Ornelas-Paz, JJ., Acosta-Muñiz, CO., Gallegos-Morales, G., Páramo-Calderón, DE., & Rios-Velasco, C. (2019). *Food Science and Technology*, 39(1): 149-157. doi.org/10.1590/fst.28117.

Bustos Agila, G. K. (2013). *Diseño en alimentos derivados de la guayaba, empleando procesos simples de conservación* (Bachelor's thesis, QUITO/PUCE/2013).

Cadaval, A., Escauriaza, B. A., Barrutia, U. G., Rodrigo, C. P., Aranceta, J., & Majem, L. S. (2005). *ALIMENTOS funcionales. Para una alimentación más saludable.*

Castro Jara, D. P. (2008). *Almidón modificado de plátano (musa paradisíaca) como una alternativa en la industria cárnica* (Bachelor's thesis, Univesidad del Azuay).

Chávez-Salazar, A., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Castellanos-Galeano, F. J., Álvarez-Barreto, C. I., & Pacheco-Vargas, G. (2017). Isolation and partial characterization of starch from banana cultivars grown in Colombia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 240–246. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.02

- El desarrollo, r. p. alimentos funcionais: impacto e desafios para o desenvolvimento e bem-estar da sociedade colombiana. facultad de ciencias agrarias, 140.
- Encarnación, S. S., & Salinas, J. D. (2017). Elaboración de harina de plátano verde (*Musa paradisiaca*) y su uso potencial como ingrediente alternativo para pan y pasta fresca (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2017.).
- Espinosa Solis, V. (2011). Propiedades de digestión de almidones nativos y modificados de plátano y mango (Doctoral dissertation).
- Fuentes-Berrio, L., Acevedo-Correa, D., & Gelvez-Ordóñez, v. í. c. t. o. r. (2015). Alimentos funcionales: impacto y retos para el desarrollo y bienestar de la sociedad colombiana. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 13(2), 140-149.
- García Hernández, J. (2011). Técnicas moleculares aplicadas a la caracterización y estudio de la supervivencia de bacterias lácticas del yogur (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Glucotein (Harina de plátano verde y de chícharo). (s. f.-b). NaturalSlim En México. <https://www.tiendanaturalslim.com/products/glucotein>
- Harina Morama para hotcakes enriquecido con proteína 350g. (s. f.). MercadoLibre. <https://www.mercadolibre.com.mx/harina-morama-para-hotcakes-enriquecido-con-proteina-350g>
- Jiménez Márquez, E. (2012). Elaboración de harina de 3 variedades de plátano verde (*musa spp*) y su uso como materia prima para la planificación (Master's thesis).
- López, G. B., & Montaña, F. J. G. (2015). Functional properties of banana (*Musa sp*). *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 14(2), 22-26.
- Magallán Barros, S. J., & Nazareno Lorenty, C. H. (2018). Análisis del uso de la harina de plátano aplicada en pastelería y repostería (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química).
- Molino de piedra Harina para brownies de plátano macho 384g. (s. f.-b). [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1385326201-molino-de-piedra-harina-para-brownies-de-platano-macho-384g-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1385326201-molino-de-piedra-harina-para-brownies-de-platano-macho-384g-_JM)

- Montoya López, J. (2020). Formulación de una matriz alimentaria a base de harina de plátano Dominico Hartón (*Musa paradisiaca* L.) para el diseño de alimentos funcionales libres de gluten
- Neder Suárez, D. (2017). Efecto de la extrusión-cocción en la formación de almidón resistente y su aplicación en el desarrollo de productos con efecto hipoglucemiante (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Quirós, V. (2015). Efecto de la sustitución de harina de maíz con almidones de origen tropical (camote (*Ipomea batatas*), ñame (*Dioscorea esculenta*), tiquisque (*Xanthosoma sagittifolium*) y yuca (*Manihot esculenta*)) en el desarrollo de una tortilla de formulación industrial en sus características de calidad, variación del almidón resistente e índice glicémico.
- Soto Azurduy, V. S. (2010). Cuantificación de almidón total y de almidón resistente en harina de plátano verde (*Musa cavendishii*) y banana verde (*Musa paradisiaca*). *Revista boliviana de química*, 27(2), 94-93.
- Torres-González, M. P., Jiménez-Munguía, M. T., & Bárcenas-Pozos, M. E. (2014). Harinas de frutas y/o leguminosas y su combinación con harina de trigo. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8(1), 94-102.
- Vegaffinity. (2014b, septiembre 9). Frutas. Vegaffinity. <https://www.vegaffinity.com/comunidad/alimento/platano-macho-beneficios-informacion-nutricional--f420>
- Villarroel, P., Gómez, C., Vera, C., & Torres, J. (2018). Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista chilena de nutrición*, 45(3), 271-278.