



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN CAMPUS TUXTEPEC

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**Caracterización parcial del almidón resistente tipo IV,
capacidad antioxidante de la harina *Moringa oleífera* y
su uso como ingredientes funcionales en la elaboración
de una sopa instantánea.**

PRESENTA

IBQ. YAMEL IVONE SOLANO GARCÍA

Para obtener el grado

Maestra en Biotecnología

Director de Tesis

Dra. Delia Esther Páramo Calderón

Co-Director de Tesis

Dr. Alejandro Aparicio Saguilán

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca. Enero, 2021

Asignación de jurado

Autorización de impresión



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus tuxtepec

MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

RECONOCIMIENTO

Esta tesis fue realizada en los Laboratorios de Innovación Tecnológica Sustentable en Materiales y Nanotecnología (LITSUS-MN), y Análisis Instrumental de la Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec bajo la dirección de la Dra. Delia Esther Páramo Calderón y la codirección del Dr. Alejandro Aparicio Saguilán. Se contó con la asesoría del Dr. Juan Pablo Hernández Uribe para el análisis de digestibilidad en el Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Hidalgo.

La investigación se realizó con el apoyo de la beca CONACyT con número de becario 942568 en el marco del programa de Maestría en Biotecnología con registro PNPC 00313. Así mismo con el apoyo Complementario para Mujeres Indígenas Becarias CONACyT.



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus tuxtepec

MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

CARTA DE RESPONSABILIDAD

Por medio de la presente hacemos constar que el trabajo de *tesis* “**Caracterización parcial del almidón resistente tipo IV, capacidad antioxidante de la harina de *Moringa oleífera* y su uso como ingredientes funcionales en la elaboración de una sopa instantánea**” es responsabilidad de los C. Dra. **Delia Esther Páramo Calderón**, Dr. **Alejandro Aparicio Saguilán** y **Yamel Ivone Solano García**, y que ni los datos experimentales ni el texto han sido aceptados o empleados para el otorgamiento de título, grado diferente o adicional al actual en el país o en el extranjero. La tesis es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas y ésta fue examinada por un comité tutorial, conformado por: *Dra. Delia Esther Páramo Calderón, Dr. Alejandro Aparicio Saguilán y Dr. Andrés Aguirre Cruz* así como un jurado de examen conformado: *MC. Miguel Ángel García Muñoz, Dr. Lucio Abel Vázquez León y Dra. Delia Esther Páramo Calderón* de acuerdo con el Reglamento General de Posgrado vigente, con la finalidad de darle seguimiento al estudiante, así como validar que es un trabajo de investigación original e inédito.

San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca a de del 2021.

ATENTAMENTE,

IBQ. Yamel Ivone Solano García

Dra. Delia Esther Páramo Calderón

Dr. Alejandro Aparicio Saguilán



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus tuxtepec

MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

AGRADECIMIENTOS

- Quiero expresar mis más sinceros sentimientos de gratitud a la Dra. Delia E. Páramo Calderón y al Dr. Alejandro Aparicio Saguilán, por su dedicación y comprensión desde hace cinco años para compartir sus conocimientos conmigo.
- Al Dr. Lucio Abel Vázquez León, gracias por siempre hacer un espacio y brindarme asesoría con la paciencia que lo caracteriza.
- Al Dr. Juan Pablo por el apoyo brindado en las pruebas de digestibilidad, aún a la distancia.
- Al Dr. Andrés Aguirre, gracias por compartir sus consejos a lo largo de estos dos años de revisión de mi trabajo.
- A CONACyT por la beca otorgada, sin su apoyo esto no sería posible.
- A mi esposo, por no dejarme caer cuando creía no poder más, enteramente gracias amor.
- A mi comadre Sofi, gracias mana por siempre tener una buena plática de aliento que salvara parte del estrés.



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus tuxtepec

MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

DEDICATORIA

- A mis padres, sé la felicidad que les causa cada éxito que he alcanzado, gracias por siempre creer en mi, en el apoyo de cada paso que doy, esto es para ustedes.
- A mi hija y esposo, mi razón de esforzarme cada día un poco más, de tener esa personita que me alienta y otra gran persona que me apoya de mil maneras. Esto es para nosotros.
- **Gracias bendito Dios** por permitirme concluir esta etapa significativa en mi vida. Todos los sacrificios y el trabajo han valido la pena. Hoy gracias a ti, puedo decir con satisfacción que alcancé un triunfo.

ÍNDICE

1	ANTECEDENTES	3
1.1	ALIMENTOS FUNCIONALES (AF)	3
1.1.1	Antecedentes de los AF	3
1.1.2	Características de los AF	4
1.1.3	Estrategias para el diseño de AF	4
1.2	INGREDIENTES FUNCIONALES	5
1.2.1	Almidón	6
1.2.1.1	Generalidades del almidón.....	6
1.2.1.2	Estructura química del almidón.....	8
1.2.1.2.1	Amilosa.....	8
1.2.1.2.2	Amilopectina.....	9
1.2.1.3	Digestibilidad del almidón.....	10
1.2.1.4	Factores que afectan la digestión del almidón.....	11
1.2.1.5	Almidón resistente (AR).....	13
1.2.1.5.1	Clasificación del AR.....	13
1.2.1.5.2	Efectos fisiológicos del AR.....	14
1.2.1.5.3	Métodos de obtención del AR.....	16
1.2.2	Antioxidantes naturales	18
1.2.2.1	Compuestos bioactivos con actividad antioxidante.....	18
1.2.2.2	Mecanismos de acción de los compuestos antioxidantes.....	19
1.2.3	Moringa oleífera	20
1.2.3.1	Generalidades de la planta.....	20
1.2.3.2	Valor nutricional de <i>Moringa oleífera</i>	21
1.2.3.3	Compuestos bioactivos de <i>Moringa oleífera</i>	22
1.2.3.4	Efectos fisiológicos de <i>Moringa oleífera</i>	24
1.3	SOPAS INSTANTÁNEAS	26
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	30
3	JUSTIFICACIÓN	31
4	HIPÓTESIS	32
5	OBJETIVOS	33
5.1	OBJETIVO GENERAL	33

5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
6	MATERIALES Y MÉTODOS	34
6.1	MATERIALES	34
6.2	METODOLOGÍA	34
6.3	OBTENCIÓN DE LOS INGREDIENTES FUNCIONALES	35
6.3.1	Harina de <i>Moringa oleífera</i>	35
6.3.2	Harina de plátano	35
6.3.3	Aislamiento del almidón	35
6.3.4	Modificación química del almidón (Entrecruzamiento)	36
6.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS INGREDIENTES FUNCIONALES	36
6.4.1	Harina de plátano	36
6.4.1.1	Análisis químico proximal	36
6.4.1.2	Perfil de pasting	36
6.4.1.3	Análisis por difracción de rayos X (DRX)	37
6.4.2	Almidón resistente tipo IV	37
6.4.2.1	Análisis químico proximal	37
6.4.2.2	Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	37
6.4.2.3	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	37
6.4.2.4	Perfil de pasting	38
6.4.2.5	Análisis por difracción de rayos X	38
6.4.2.6	Determinación de almidón resistente (AR)	38
6.4.3	Harina de <i>Moringa oleífera</i>	39
6.4.3.1	Análisis químico proximal	39
6.4.3.2	Determinación del contenido de fenoles totales (CFT)	40
6.4.3.3	Determinación de la actividad antirradical (AAR) por ensayo DPPH	40
6.5	DISEÑO EXPERIMENTAL	41
6.6	ELABORACIÓN DE SOPAS INSTANTÁNEAS	43
6.6.1	Etapa I. Elaboración de masa para la pasta	43
6.6.2	Etapa II. Cocción y secado de la pasta	43
6.6.3	Etapa III. Reconstitución de la sopa	43
6.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
7.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS INGREDIENTES FUNCIONALES	45

7.1.1	Harina de <i>Moringa oleífera</i>	45
7.1.1.1	Análisis químico proximal.....	45
7.1.1.2	Contenido de fenoles totales (CFT) y actividad antirradical (AAR) por ensayo DPPH	46
7.1.2	Harina de plátano	47
7.1.2.1	Análisis químico proximal.....	47
7.1.2.2	Caracterización por difracción de rayos X (DRX)	48
7.1.2.3	Perfil de pasting	49
7.1.3	Almidón modificado	50
7.1.3.1	Análisis químico proximal.....	50
7.1.3.2	Caracterización por FTIR	51
7.1.3.3	Caracterización por DRX	53
7.1.3.4	Perfil de pasting	54
7.1.3.5	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	55
7.1.4	Almidón modificado con nuevas condiciones	57
7.1.4.1	Caracterización por DRX	57
7.1.4.2	Caracterización por FTIR	58
7.1.4.3	Perfil de pasting	58
7.1.4.4	Caracterización por DSC	59
7.1.4.5	Determinación del contenido de AR.....	60
7.1.5	Lotes de almidón entrecruzado	61
7.1.5.1.1	Caracterización por DRX.....	61
7.1.5.2	Perfil de pasting	62
7.2	PRODUCTO FINAL	64
8	CONCLUSIONES	66
9	PERSPECTIVAS	67
10	BIBLIOGRAFÍA	68
11	ANEXOS	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos de Alimentos Funcionales	6
Tabla 2. Contenido nutricional de las hojas de <i>Moringa oleífera</i>	21
Tabla 3. Contenido de aminoácidos en hojas de <i>Moringa oleífera</i>	22
Tabla 4. Compuestos bioactivos presentes en hojas de <i>Moringa oleífera</i>	23
Tabla 5. Composición química de sopas instantáneas comerciales	28
Tabla 6. Representación en porcentaje de cada ingrediente con respecto a la masa.	42
Tabla 7. Formulaciones de sopas	42
Tabla 8. Composición química de harinas de <i>Moringa</i>	45
Tabla 9. Contenido de fenoles totales y actividad antirradical de harinas de moringa	47
Tabla 10. Composición química de harina y pulpa de plátano	48
Tabla 11. Composición química de almidón nativo de plátano	51
Tabla 12. Temperaturas de gelatinización del ANP y almidón entrecruzado	55
Tabla 13. Condiciones de entrecruzamiento	56
Tabla 14. Temperaturas de gelatinización del ANP y almidón entrecruzado	60
Tabla 15. Contenido de almidón resistente del AME	61
Tabla 16. Valores de viscosidad de los almidones modificados	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos de Alimentos Funcionales	6
Tabla 2. Contenido nutricional de las hojas de <i>Moringa oleífera</i>	21
Tabla 3. Contenido de aminoácidos en hojas de <i>Moringa oleífera</i>	22
Tabla 4. Compuestos bioactivos presentes en hojas de <i>Moringa oleífera</i>	23
Tabla 5. Composición química de sopas instantáneas comerciales	28
Tabla 6. Representación en porcentaje de cada ingrediente con respecto a la masa.	42
Tabla 7. Formulaciones de sopas	42
Tabla 8. Composición química de harinas de <i>Moringa</i>	45
Tabla 9. Contenido de fenoles totales y actividad antirradical de harinas de moringa	47
Tabla 10. Composición química de harina y pulpa de plátano	48
Tabla 11. Composición química de almidón nativo de plátano	51
Tabla 12. Temperaturas de gelatinización del ANP y almidón entrecruzado	55
Tabla 13. Condiciones de entrecruzamiento	56
Tabla 14. Temperaturas de gelatinización del ANP y almidón entrecruzado	60
Tabla 15. Contenido de almidón resistente del AME	61
Tabla 16. Valores de viscosidad de los almidones modificados	63

RESUMEN

El consumo de sopas instantáneas en México y otros países del mundo ha ido aumentando considerablemente, a pesar que su consumo no ofrece algún beneficio nutricional. Por esta razón se ha buscado mejorar la calidad nutricional de este tipo de alimento. Una alternativa es mediante la adición de harina de *Moringa oleífera*, ya que se ha demostrado ser una fuente rica de antioxidantes, proteína y cantidades significativas de todos los aminoácidos esenciales. Por otro lado, la incorporación de almidón resistente (AR) interviene en la reducción de la respuesta glucémica, favoreciendo condiciones fisiológicas para prevenir enfermedades crónicas como diabetes mellitus, obesidad, enfermedad cardiovascular y síndrome metabólico. El objetivo del proyecto fue desarrollar una sopa instantánea con alto contenido de carbohidratos no digeribles y compuestos antioxidantes a partir de la incorporación de almidón modificado (AR tipo IV) y harina de hojas de *Moringa oleífera*. La harina de hojas de moringa (HMO) se obtuvo por molienda de hojas verdes deshidratadas (Pérez, 2003); el AR tipo IV se desarrolló mediante una reacción química por entrecruzamiento con una mezcla de trimetafosfato de sodio y tripolifosfato de sodio como agentes entrecruzantes del almidón aislado de plátano (*Musa paradisiaca* L.) variedad macho. Las sopas se elaboraron de acuerdo a la matriz de formulaciones planteadas utilizando un diseño experimental de mezclas.

El contenido de lípidos encontrados en la harina de hojas de moringa fue de 10.67 ± 0.7 g/100 g.s.s., minerales (9.49 ± 0.6 g/100 g.s.s.), el contenido de fenoles totales fue de 4.38 g EAG / 100 g.s.s., con una actividad antirradical de 2.67 g E.T./100 g.s.s. Por su parte, la modificación química condujo a la producción de almidón resistente de 46.99 ± 2.53 g/100 g.s.s. y una disminución en la viscosidad máxima en comparación al almidón nativo. Por último, el comportamiento viscoso de la harina de plátano verde resultó favorable para su uso como sustituto parcial de la sémola de trigo en el desarrollo de una formulación de sopa. La caracterización descrita sugieren el uso de la HMO y el AR4 como ingredientes potenciales en el desarrollo de productos alimenticios. Los resultados obtenidos mostraron que la adición de HMO y AR4 junto con la sustitución parcial de sémola de trigo y harina de plátano permitieron el desarrollo de sopas instantáneas, lo que podría representar una alternativa potencial como alimento funcional de alta demanda y con beneficios para el consumidor.

ABSTRACT

The consumption of instant soups in Mexico and other countries in the world has gone considerably, despite the fact that its consumption does not offer any nutritional benefit. For this reason, it has been sought to improve the nutritional quality of this type of food. An alternative is by adding *Moringa oleifera* flour, as it has been shown to be a rich source of antioxidants, protein, and significant amounts of all essential amino acids. On the other hand, the incorporation of resistant starch (RS) intervenes in the reduction of the glycemic response, favoring physiological conditions to prevent chronic diseases such as diabetes mellitus, obesity, cardiovascular disease and metabolic syndrome. The objective of the project was to develop an instant soup with a high content of indigestible carbohydrates and antioxidant compounds from the incorporation of modified starch (RS type IV) and *Moringa oleifera* leaf flour. Moringa leaf flour (MLF) was obtained by grinding dehydrated green leaves (Pérez, 2003); RS type IV was developed through a chemical reaction by crosslinking with a mixture of sodium trimetaphosphate and sodium tripolyphosphate as crosslinking agents from isolated starch from plantain (*Musa paradisiaca* L.) male variety. Soups will be prepared according to the formulations matrix proposed using an experimental design of mixtures.

The lipid content found in moringa leaf flour was 10.67 ± 0.7 g/100 g.d.s., ashes (9.49 ± 0.6 g/100 g.d.s.), the total phenol content was 4.38 g GAE / 100 g.d.s., with an anti-radical activity of 2.67 g T.E. /100 g.d.s. For its part, the chemical modification led to the production of starch resistant to 46.99 ± 2.53 g/100 g.d.s., and a decrease in maximum viscosity compared to native starch. Finally, the green banana flour showed a viscosity of 4.25 Pa.s, which is favorable for its use as a partial substitute for wheat semolina in the development of a soup formulation. The characterization described suggests the use of MLF and RS4 as potential ingredients in the development of food products.. The results obtained that the addition of MLF and RS4 together with the partial substitution of wheat semolina and banana flour allowed the development of instant soups, which could represent a potential alternative as a functional food in high demand and with benefits for the consumer.

INTRODUCCIÓN

Una alimentación saludable es fundamental para el desarrollo óptimo en niños y adolescentes, puesto que asegura la energía suficiente para que una persona tenga una actividad física vigorosa, así como un aprovechamiento óptimo de sus capacidades cognitivas durante todo el ciclo de vida (Martínez & Villezca, 2003). Sin embargo, el aumento de la urbanización en los últimos años ha ocasionado modificaciones en los hábitos alimenticios, aumentando la ingesta de grasas saturadas y carbohidratos simples, aunando a esto, el estilo de vida actual que conlleva una reducción de actividad física, tanto en el trabajo como en el tiempo de ocio, promueve el desarrollo de enfermedades crónicas no transmisibles (FAO/WHO, 2003; Drewnowski & Popkin, 1997; Ferro-Luzzi & Martino, 1996), tales como las enfermedades cardiovasculares (ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares), el cáncer, las enfermedades respiratorias (enfermedad pulmonar obstructiva crónica y asma) y la diabetes; dichas enfermedades representan el 71% de las muertes a nivel mundial (OMS, 2018).

Ante esta problemática, la población se ve en la necesidad de consumir alimentos que les permitan alcanzar o mantener su estado de salud; en este sentido, la innovación tecnológica en la Industria de Alimentos se ha enfocado en el área del desarrollo de nuevos productos, llamados “Alimentos Funcionales (AF)”, los cuales se han definido de acuerdo con Ashwell, (2005) como el “alimento en los que algunos de sus componentes afectan funciones del organismo de manera específica y positiva, promoviendo un efecto fisiológico más allá de su valor nutritivo tradicional”. El desarrollo de AF abarca productos desde panificación, lácteos (y/o derivados) y pastas, incluyendo sopas instantáneas. El beneficio otorgado por los AF es atribuido al contenido de ingredientes funcionales, por ejemplo: determinados minerales, vitaminas, ácidos grasos o fibra dietética, fitoquímicos u otros antioxidantes, y los probióticos, que tienen cultivos vivos de microorganismos beneficiosos (Luengo, 2007).

En este sentido, el proyecto fue dirigido al uso de almidón resistente, el cual juega un papel importante en la reducción de los niveles de glucosa en la sangre postprandial, aumentando la saciedad, disminuyendo el riesgo de obesidad, cambiando la sensibilidad a la insulina en pacientes con diabetes tipo II (Kieffer *et al.*, 2016; Bindels *et al.*, 2017; Emilien *et al.*, 2017). Entre los distintos tipos de AR, el tipo IV (AR4), se obtiene mediante modificación química, donde nuevos enlaces no glucosídicos son formados a través de esterificación, reticulación o transglicosilación, y no pueden descomponerse, ya que el

proceso de modificación hace que la estructura sea inaccesible a la digestión por amilasas. Estos almidones se utilizan como aditivos en una gama amplia de productos alimenticios para mejorar la viscosidad y/u otras características tecnológicas y sensoriales (Ai *et al.*, 2013).

Actualmente existe una amplia variedad de alimentos funcionales, parte de ellos son enriquecidos con compuestos bioactivos, principalmente compuestos fenólicos, debido a los múltiples efectos positivos, como es su acción antioxidante y poder eliminador de radicales libres (Martínez-Flórez *et al.*, 2002). Una fuente natural que ha sido reportada con alto contenido de proteína (incluyendo los aminoácidos esenciales) y compuestos fenólicos, es el árbol de *Moringa oleífera* (Meena *et al.*; 2010), cuya harina obtenida a partir de las hojas ha sido utilizada en la fortificación de varios productos comestibles.

El objetivo de este trabajo fue elaborar una sopa instantánea incorporando harina de hojas de *Moringa oleífera* en combinación con almidón resistente tipo IV modificado químicamente por entrecruzamiento a partir del almidón de plátano *Musa paradisiaca* variedad macho, con la finalidad de obtener un producto con propiedades funcionales, de fácil acceso, rápida preparación y consumo, así como también con alta demanda.

1 ANTECEDENTES

1.1 Alimentos Funcionales (AF)

1.1.1 Antecedentes de los AF

La relación alimento-medicina fue conocida por la cultura china hacia el año 1000 a.C. Hace 2500 años, Hipócrates hacía referencia a la frase: "Deje que la comida sea su medicina y la medicina sea su comida", sin embargo los cambios en el estilo de vida actual han modificado los hábitos de alimentación, lo cual ha ocasionado efectos negativos en la salud.

Durante los primeros años del siglo XX, el avance científico se centró en identificar elementos esenciales (en particular las vitaminas) y su papel en la prevención de diversas enfermedades por deficiencia de la dieta. Sin embargo, este énfasis en las deficiencias de nutrientes cambió drásticamente durante la década de 1970, cuando las enfermedades relacionadas con el exceso y la "desnutrición" se convirtieron en un problema importante de salud pública. Todos estos informes dirigidos a políticas públicas y educación, enfatizaron la importancia de consumir una dieta baja en grasas saturadas y alta en verduras, frutas, cereales integrales y legumbres para reducir el riesgo de enfermedades crónicas (enfermedades del corazón, cáncer, osteoporosis, diabetes y derrame cerebral) (Hasler, 2002).

Las enfermedades crónicas han generado un costo creciente en el sector salud; por lo que, ante un esfuerzo nacional por reducir el costo, en 1991 se estableció la categoría de alimentos potencialmente beneficiosos, que se espera ejerzan un efecto beneficioso sobre la salud, denominados "alimentos de uso específico para la salud" (Foods for Specific Health Use, FOSHU). Todo eso, ha generado un gran interés por desarrollar nuevos alimentos con mejores características nutricionales, o inclusive, mejorar los productos alimenticios ya existentes y que sean capaces de aportar beneficios positivos a la salud. La Innovación Tecnológica en la Industria Alimentaria, se ha dirigido en los últimos años, al procesamiento de Alimentos Funcionales. El término "alimentos funcionales" se introdujo por primera vez en Japón a mediados de la década de 1980 y se refiere a alimentos procesados que contienen ingredientes que ayudan a funciones corporales específicas además de ser nutritivos (Claire *et al.*, 2018).

1.1.2 Características de los AF

En el proyecto de la Unión Europea (UE) referido a la Acción Concertada sobre Ciencia de los Alimentos Funcionales en Europa (FUFOSE), se propusieron los aspectos principales de una definición operativa de este tipo de alimentos:

“Un alimento puede considerarse funcional, si”:

- Se demuestra satisfactoriamente que ejerce un efecto beneficioso sobre una o más funciones selectivas del organismo, además de sus efectos nutritivos intrínsecos, de tal modo que resulte apropiado para mejorar el estado de salud y bienestar, reducir el riesgo de enfermedad, o ambas cosas.
- La presentación de los alimentos funcionales sigue siendo como alimentos, y deben demostrar sus efectos en las cantidades en que normalmente se consumen en la dieta.
- No se trata de comprimidos ni cápsulas, sino de alimentos que forman parte de un régimen normal.
- Deben cumplir pruebas de que el producto alimenticio final, y no sus componentes individuales aislados, probablemente ejerza un efecto saludable sobre el organismo cuando se lo consume como parte de una dieta corriente (Ashwell, 2004).
- Un alimento funcional no otorga beneficios para toda la población en general, sino muchas veces va dirigido hacia un público en específico.

1.1.3 Estrategias para el diseño de AF

A lo largo de los años, la tecnología alimentaria ha desempeñado muchas funciones importantes, principalmente extender el periodo de conservación de los alimentos y que por añadidura, preserven la salud. Posteriormente, se permitió agregar otros atributos a los alimentos, tales como el sabor, la manipulación y la garantía de calidad nutricional.

Actualmente, el avance tecnológico va dirigido hacia la búsqueda de nuevas estrategias para el desarrollo de una amplia gama de alimentos funcionales, como se mencionan a continuación:

- **Enriquecimiento**

Enriquecido por algún componente ya sea nutriente o no nutriente para que produzca beneficios (por ejemplo, vitaminas, antioxidantes, minerales, probióticos seleccionados, de

probados efectos beneficiosos sobre la salud). O bien, aumentar la biodisponibilidad de uno o más de sus componentes para mejorar la asimilación de un componente beneficioso. Sin embargo, se debe tomar en cuenta también la protección de algunos nutrientes sensibles y/o inestables, que a su vez incluye la aplicación de estrategias tecnológicas para limitar las pérdidas. Estas incluyen envasado impermeable al oxígeno y a la luz, encapsulación, en nitrógeno inerte, y uso de antioxidantes más lábiles para protegerlos.

- **Extracción y separación**

Las tecnologías de extracción y separación pueden emplearse para eliminar un componente del alimento, tal manera que sus efectos adversos sobre la salud sean menor y no interfiera con su valor nutricional óptimo (por ejemplo, la disminución de ácidos grasos saturados, eliminación del colesterol de las yemas de huevo y la destrucción de fitatos en cereales).

- **Modificación**

Modificando químicamente alguno de sus componentes, por ejemplo, los hidrolizados proteicos adicionados en los preparados para lactantes para reducir el riesgo de alergenicidad, o bien, la combinación de cualquiera de las posibilidades anteriores descritas (Ashwell, 2004).

1.2 Ingredientes funcionales

En el contexto más amplio, todos los alimentos se consideran "funcionales". Sin embargo, algunos alimentos pueden ser particularmente utilizados para alterar selectivamente procesos fisiológicos específicos que mejoran la calidad de vida o reduzcan el riesgo de adquirir una enfermedad. Los beneficios obtenidos de la dieta dependen de componentes específicos en los alimentos, llamados "Ingredientes Funcionales". (Halser, 1996; Glinsmann, 1996 & Clydesdale, 1997).

Las nuevas tendencias en la industria alimentaria se han centrado en la búsqueda de ingredientes funcionales para enriquecer los alimentos, esto, debido al cambio en los hábitos de la población y la búsqueda constante de alimentos más saludables. La gran mayoría de estos componentes se derivan de las plantas; sin embargo, existen varias clases de ingredientes alimentarios funcionales fisiológicamente activos de origen animal o microbiano. La tabla 1 ejemplifica algunos alimentos funcionales y el beneficio del ingrediente funcional.

Tabla 1.Ejemplos de Alimentos Funcionales

Alimento funcional	Ingrediente funcional	Beneficio para la salud	Tipo de ensayo
Psyllium (laxante)	Fibra soluble	Disminución de colesterol total y lipoproteínas de baja densidad	Clínico
Soja	Proteína	Disminución de colesterol total y lipoproteínas de baja densidad	Clínico
Pescado	Ácidos grasos omega-3	Disminución de triglicéridos, enfermedades cardíacas e infarto de miocardio fatal y no mortal.	Epidemiológicos
Ajo	Compuestos organosulfurados	Disminución de colesterol total y lipoproteínas de baja densidad	Clínicos
Té verde	Catequinas	Disminución del riesgo de ciertos tipos de cáncer	Epidemiológico
Tomates y productos elaborados de tomate	Lycopeno	Disminución de cáncer de próstata	Epidemiológico
Cordero, pavo, ternera.	Ácido linoleico conjugado	Disminución del cáncer de mama	<i>In vivo e in vitro</i>
Vegetales crucíferos	Glucosinolatos	Disminución del riesgo de ciertos tipos de cáncer	Epidemiológico
Productos lácteos fermentados	Probióticos	Favorece la salud gastrointestinal y aumenta la inmunidad.	Estudio <i>in vivo e in vitro</i> .
Vino tinto y jugo de uva	Polifenoles	Disminución de agregación plaquetaria	Clínico
Chocolate	Flavonoides	Disminución del estrés oxidativo en el colesterol.	Clínico

Datos obtenidos de Hasler, 2002.

1.2.1 Almidón

1.2.1.1 Generalidades del almidón

Los carbohidratos son los componentes principales de los cereales y representan 50 a 70 % del peso seco del grano; de éstos, el almidón y otros polisacáridos (fibra dietética) son los principales constituyentes (French, 1984).

El almidón es el carbohidrato principal en la naturaleza y es una fuente de energía para muchos organismos, se constituye de dos polisacáridos con estructura diferente; la amilosa, siendo un polímero esencialmente lineal, y la amilopectina altamente ramificada (Shevkani *et al.*, 2017). En la célula se organiza en partículas discretas (gránulos), cuyo tamaño puede variar de 1 a 100 μm , y contiene proporciones variables de amilosa y

amilopectina, ambos constituidos de cadenas de D-glucosa unidos mediante enlaces α -1,4 (Freitas *et al.*, 2004; Munhoz *et al.*, 2004). Los gránulos de almidón extraídos y secados, tienen la apariencia de un polvo blanco y son insolubles en agua fría. Presentan una composición química con 0.06-0.53 % de proteína, 0.05-0.8 % de lípidos y 0.07-1.4 % de cenizas y el resto lo forma el almidón propiamente dicho. Los gránulos de almidón en su forma nativa contienen aproximadamente del 10 al 12 % de agua, la misma que es muy importante con relación a las propiedades fisicoquímicas y al modo de reacción del gránulo (Guilbot & Mercier, 1985). El porcentaje del contenido de almidón, dependerá de la fuente botánica, por ejemplo, se han reportado fracciones importantes de almidón en leguminosas (25 – 50%), cereales (30 a 80%), tubérculos (60 – 90%) y en algunas frutas en estado inmaduro (hasta 70%) en base seca, como lo son plátano y mango (Bello-Pérez & Paredes-López., 1999). Normalmente un almidón presenta un contenido de 25 % de amilosa y 75 % de amilopectina aproximadamente. En este sentido, la aplicación del almidón dependerá de sus propiedades funcionales, tales como solubilidad, capacidad de retención de agua, poder de hinchamiento, estabilidad del gel, espesante, claridad de geles y resistencia al corte, formación de película, digestibilidad enzimática y capacidad de emulsificación; las cuales son determinadas por la estructura química del mismo (Casarrubias, 2010).

En los últimos años, la importancia de enfocar la investigación a esta fuente de carbohidratos ha sido con la finalidad de renovar y ampliar sus usos. Ha sido usado principalmente para cuatro propósitos en general (Bello *et al.*, 2000; Bernal & Martínez 2006; Delville *et al.*, 2002; Guzmán, 1992; Steven, 1995; Thomas & Atwell, 1999) como se menciona a continuación:

- Conferir ciertas características organolépticas a los alimentos como textura y consistencia, la cual es dada por sus componentes poliméricos de alto peso molecular. La cantidad y tipo de almidón utilizado se convierten en puntos críticos para obtener las características organolépticas deseables.
- Para la nutrición humana y/o animal, ya que es la fuente de energía más importante, representa el 80% de la ingesta calórica mundial. También para producir edulcorantes de alta intensidad y sustitutos de grasas, ya que este tipo de productos son utilizados en la elaboración de alimentos bajos en calorías.
- Para ciertas aplicaciones industriales como la fabricación de pegamentos, pinturas, espesantes y texturizantes en las industrias del papel y textil.

- En la producción de bioenergéticos (bioetanol).
- En el contexto ecológico, por ejemplo, el almidón ha empezado a fungir como un elemento fundamental en cuanto a la fabricación de plásticos biodegradables.

Material encapsulante de compuestos bioactivos, sabores y/u olores para su incorporación en un producto alimenticio o farmacéutico (Jane *et al.*, 1992; Qi & Xu 1999; Zhao & Whistler 1994a, b).

1.2.1.2 Estructura química del almidón

El tamaño y la morfología de los gránulos de almidón varían dependiendo de la fuente vegetal. Las formas que adoptan estos gránulos son redondas, elípticas, ovales, lenticulares, poliédricas o poligonales e incluso de forma irregular (Jane *et al.*, 1994; Lineback, 1984).

Independientemente de la fuente botánica y en el contexto químico, el almidón es un polímero de glucosa que en la mayoría, el promedio de su estructura glucosídica está conformada por una mezcla de amilosa (20%) y la amilopectina (80%) aproximadamente unidos entre sí por enlaces glicosídicos α -1-4 y α -1-6, y una fracción menor (de 1% a 2%) de conformación no glucosídica (French, 1984). A pesar de que estas dos moléculas tienen básicamente la misma estructura, presentan diferente cantidad y tipos de enlace. La cantidad relativa de cada uno de los polímeros, así como su organización dentro de la estructura granular, el grado de polimerización, la longitud y distribución de cadenas de la amilopectina, le confieren propiedades fisicoquímicas y funcionales únicas (Bello-Pérez, 1995).

1.2.1.2.1 Amilosa

La amilosa es un polímero esencialmente lineal, formado por unidades D-glucosa unidos por enlaces α -1-4 (Figura 1A); sin embargo también se le han atribuido algunas ramificaciones unidas por enlaces α -1-6. (Thomas & Atwell, 1999). Dichas ramificaciones se encuentran de manera espaciada e infrecuente, por lo que se comporta como un polímero lineal (Lineback & Rasper, 1988; Zang *et al.*, 2013) (Figura 1B). Algunos autores

han ilustrado que la amilosa de peso molecular pequeño, tiende a ser lineal, mientras que la de peso molecular grande, consiste en múltiples cadenas extra largas (DP > 2730).

La amilosa es a menudo helicoidal, y se ha considerado que las regiones helicoidales son relativamente rígidas y presentan de 10 a 15 giros por región, en cada giro se utilizan seis moléculas de glucosa (Whistler & Daniel, 1984). El interior de la hélice contiene átomos de hidrógeno y, por lo tanto, es hidrófobo (Curá *et al.*, 1995).

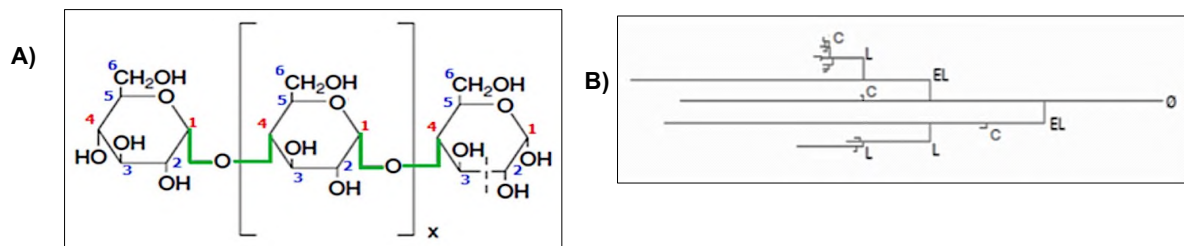


Figura 1. Moléculas de amilosa (Pérez *et al.*, 2009).

- A)** Unidad fundamental de la molécula de amilosa mostrando el enlace α -1,6. **B)** Estructura de amilosa ramificada con diferentes longitudes de cadena: EL= extremadamente largas, L= largas y C= cortas.

La amilosa tiene la capacidad para formar un gel después de que el gránulo de almidón se haya gelatinizado. Este comportamiento es evidente en almidones con alto contenido de amilosa, se consideran almidones gelificantes. La formación de gel es principalmente el resultado de la retrogradación de los polímeros de almidón solubilizados después de la cocción y puede ocurrir con bastante rapidez con la amilosa de polímero lineal (Whistler *et al.*, 1997).

1.2.1.2.2 Amilopectina

La amilopectina está constituida de una estructura ramificada con cerca del 95% por enlaces α -1-4, y 5% por enlaces α -1-6 (Figura 2). Las cadenas de amilopectina son relativamente cortas comparadas con la amilosa, con un perfil de distribución amplio (MacAllister, 1979; Gallant & Bouchet, 1986; Tester *et al.*, 2004). Los estudios sugieren una distribución de tamaño bimodal de cadenas de polímeros, es decir, cadenas pequeñas y grandes. Las cadenas pequeñas tienen un grado de polimerización (DP) de

aproximadamente 15, mientras que el de las cadenas más grandes es aproximadamente 45 (Whistler *et al.*, 1997).

Las láminas semi-cristalinas consisten en regiones ordenadas, que a su vez están compuestas de dobles hélices formadas por cadenas de amilopectina, las regiones amorfas de las láminas semi-cristalinas están compuestas por puntos ramificados de la amilopectina y por la amilosa (Zobel, 1988). En el caso de almidones ricos en amilopectina, la cristalinidad es atribuida a las cadenas en forma de doble hélice de la amilopectina, por lo que la amilosa no parece tener algún efecto significativo en la cristalinidad en condiciones normales. Diversos investigadores (Myllärinen *et al.*, 2002; Romero-Bastida *et al.*, 2005; Stading *et al.*, 2001), han reportado que la amilosa es responsable de otorgar la capacidad de formación de película al almidón.

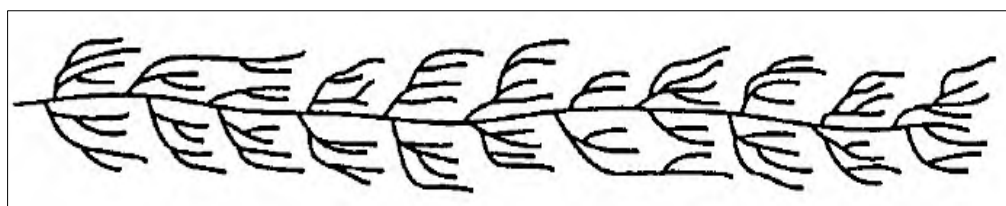


Figura 2. Molécula de Amilopectina (Whistler & BeMiller, 1997).

Debido a la estructura altamente ramificada de la amilopectina, sus propiedades difieren de la amilosa, por ejemplo, la retrogradación es más lenta y la formación de gel puede tardar días o semanas. Las pastas de almidones que contienen esencialmente toda la amilopectina (almidones cerosos) se consideran no gelificantes, pero típicamente tienen una textura cohesiva y gomosa (Curá *et al.*, 1995; Hood, 1982).

1.2.1.3 Digestibilidad del almidón

La digestión del almidón, tanto de la amilosa como de la amilopectina, está principalmente mediada por amilasas, dextrinasas y disacaridasas que actúan hidrolizando el almidón a monómeros de glucosa que se absorben directamente a través de la mucosa intestinal (Villarroel *et al.*, 2018). La digestión y absorción de este polisacárido tiene lugar en el intestino delgado y está mediada por la hidrólisis enzimática de la α -amilasa al entrar en contacto de la saliva. El material parcialmente digerido se hidroliza por α -amilasa pancreática, mientras otras enzimas α y β terminan de romper las ramificaciones de enlaces

α -1,6 de la amilopeptina presentes en el borde de las microvellosidades (Park & Rollings, 1994). El producto principal de la digestión de los carbohidratos es la glucosa originada principalmente a partir del almidón. La glucosa se mueve por el organismo a través de la sangre. Los azúcares absorbidos (intracelulares) son transportados por la sangre portal hasta el hígado. Los carbohidratos estructurales, celulosa y hemicelulosa, componentes de la fracción fibrosa atraviesan el tracto intestinal sin absorberse. Y finalmente son sometidos a una acción microbiana muy limitada por las celulasas bacterianas desprendiéndose algunos ácidos grasos volátiles que son absorbidos por la sangre portal.

Basado en su velocidad de digestión, el almidón actualmente se ha clasificado en:

- Almidón de digestión rápida (**ADR**): Hidrolizado durante los primeros 20 minutos después de su consumo.
- Almidón de digestión lenta (**ADL**): Hidrolizado dentro de los 20 a 120 minutos.
- Almidón resistente (**AR**): Resiste el ataque enzimático después de los 120 min y sigue su tránsito al intestino grueso (Alcázar y Almeida, 2015).

El consumo de AR interviene en la reducción de la respuesta glucémica y disminuye la concentración de lípidos en suero, favoreciendo condiciones fisiológicas para prevenir enfermedades como diabetes mellitus, obesidad, enfermedad cardiovascular, síndrome metabólico y cáncer de colon (Englyst & col. 1992; Gao & col. 2014).

1.2.1.4 Factores que afectan la digestión del almidón

La digestibilidad del almidón depende de la estructura del gránulo nativo, que tiene una disposición semi-cristalina compleja y altamente ordenada. Uno de los principales factores que afectan la digestibilidad del almidón y su respuesta fisiológica se atribuye al tamaño del gránulo, estructura molecular y a la relación amilosa/amilopeptina, además del origen botánico que determina la organización y la morfología cristalina del polisacárido (Tester *et al.*, 2004).

Toutounji, *et al.*, (2019) menciona que los factores intrínsecos, como son la naturaleza de la estructura del almidón afecta la digestibilidad del carbohidrato, principalmente en el arroz, a medida que aumenta la longitud de cadenas de glucanos, la digestión tiende a disminuir. Mientras que los factores extrínsecos (cosecha y procesamiento de alimentos) también juegan un papel importante en la digestión del almidón, se ha reportado que las condiciones

de almacenamiento del arroz después de la cosecha influyó en la digestibilidad del almidón, pero este efecto dependió de la temperatura.

Por otra parte, las interacciones no covalentes entre el almidón y compuestos fenólicos han dado como resultado la formación del complejo de inclusión de amilosa. Este tipo de interacciones afectan en gran medida las propiedades fisicoquímicas y nutricionales de los almidones, las cuales dependen de la composición química del extracto fitoquímico, el tipo de compuesto fenólico, la estructura del almidón y las condiciones experimentales. Por lo que la combinación de estos factores pueden emplearse durante la formulación y procesamiento de alimentos, y es por tanto, factible para nuevas aplicaciones alimentarias funcionales (Zhu, 2015).

La presencia de lípidos en sistemas de almidón forman complejos amilosa-lípido, que disminuye la capacidad de hinchamiento del almidón, solubilidad y ruptura de los gránulos, afectando directamente la digestibilidad del almidón. A mayor contenido de lípidos generalmente se requiere más temperatura de gelatinización y entalpías más bajas, la viscosidad comienza a aumentar a temperaturas más altas y el valor máximo también se alcanza a temperaturas más altas, de tal manera que este tipo de complejo es resistente a la degradación enzimática (α -amilasa, amilo-glucosidasa e isoamilasa) (Quiroga-Ledezma, 2018).

Otro sistema que influye en la digestibilidad es la barrera protectora de proteínas que se forma alrededor de los gránulos de almidón, que lo hacen más resistentes al ataque resistente. Este tipo de almidón compuesto con proteínas se categoriza como almidón de digestión lenta (Lehmann & Robin, 2007).

Las condiciones de procesamiento también juegan un papel importante en la digestión del almidón, por ejemplo, los tratamientos hidrotérmicos en donde el almidón sufre el proceso de gelatinización, hace que el almidón pase de una forma semicristalina (relativamente indigestible) a una forma amorfa que sea fácilmente digerible (Tester & Debon, 2000).

Las modificaciones físicas como molienda o extrusión generan daños a los gránulos. Por ejemplo, la molienda reduce la cristalinidad de la molécula de amilopectina y su conformación de doble hélice. En la extrusión, los gránulos de almidón se someten a fuerzas de cizallamiento mecánicas en un ambiente de humedad baja. Este tipo de modificaciones que generan afectaciones en la estructura del gránulo como grietas, cortes o compresión,

afectan la digestibilidad del almidón y puede reducir el contenido de AR (Martínez *et al.*, 2014).

La modificación química del almidón implica la introducción de grupos funcionales en la molécula de almidón. Por ejemplo el entrecruzamiento, se utiliza para aumentar la cantidad de AR, lo cual se relaciona directamente con la digestibilidad el mismo (Alcázar-Alay, 2015). En este sentido, es importante mejorar la comprensión del impacto del procesamiento sobre la digestibilidad del almidón pueden proporcionar una herramienta eficaz para que la tecnología de alimentos manipulen la digestibilidad del almidón de diversas fuentes, brindando alimentos con menor digestibilidad y propiedades sensoriales aceptables.

En general, los almidones con una gran cantidad de amilopectina se utilizan como fuente de almidón resistente a la digestión enzimática (RS), mientras que los almidones cerosos completamente gelatinizados sirven como fuente de almidón de rápida digestión (RDS) (Behall, Scholfield & Canary, 1988).

1.2.1.5 Almidón resistente (AR)

En términos de digestibilidad, no todo el almidón en la dieta es digerido y absorbido en el intestino delgado (Ratnayake & Jackson, 2008). El almidón resistente (AR) se define como la porción que no es hidrolizado después de los 120 minutos del consumo y continúa su paso al intestino grueso (Englyst *et al.*, 1992), donde luego es fermentado por las bacterias de la flora normal del colon, dando como producto de la fermentación ácidos grasos de cadena corta (AGCC) (Englyst & Cummings, 1987). El AR se ha dividido en 5 clases, los cuales se definen principalmente según las características físicas y químicas (Dupuis *et al.*, 2014):

1.2.1.5.1 Clasificación del AR

- **AR1:** Es un almidón físicamente no disponible para ser digerido al estar protegido por las paredes celulares vegetales. Se puede encontrar en legumbres, cereales y semillas (Sajilata *et al.*, 2006).
- **AR2:** Está compuesto de gránulos de almidón nativo de fuentes botánicas selectas, como papas, plátanos verdes, almidón de maíz con alto contenido de amilosa y algunas legumbres. En estos almidones, la molécula de amilopectina tiene una mayor proporción

de ramas de cadena larga, lo que da como resultado una estructura más rígida, que carece de puntos débiles, lo que hace que los gránulos de almidón nativos sean altamente resistentes al ataque enzimático (Jiang & Jane 2013). Si se utilizan altas temperaturas al cocinar se hace digestible.

- **AR3:** Es el almidón retrógrado y se crea cuando la gelatinización es seguida por un período de enfriamiento durante un período prolongado. La generación de AR3 depende en gran medida de la cantidad y longitud de sus cadenas de amilosa, siendo más beneficiosas las cadenas más largas (Luckett & Wang, 2012). Además de lo mencionado anteriormente, el número de ciclos de enfriamiento / calentamiento realizados y el tiempo y la temperatura de almacenamiento también influyen en el grado de retrogradación, que puede afectar el contenido de AR (Dupuis *et al.*, 2014).

- **AR4:** almidones modificados químicamente, donde nuevos enlaces químicos son formados a través de esterificación, reticulación o transglicosilación y no pueden descomponerse, ya que el proceso de modificación hace que la estructura sea inaccesible a la digestión por amilasas. Estos almidones se usan como aditivos en gran variedad de productos alimentarios para mejorar la viscosidad y otras características tecnológicas y sensoriales (Ai Y *et al.*, 2013).

- **AR5:** Se caracteriza por un componente lipídico que se ha complejado con la amilosa para formar una estructura helicoidal que contiene una cola de ácido graso dentro de la cavidad central (Hasjim y otros 2013). Estos complejos pueden formarse durante el procesamiento / cocción, como el pan que contiene grasa como ingrediente, o artificialmente y de esta forma ser agregados a los alimentos, como almidones altos en amilosa acomplejados con ácidos grasos (Lau *et al.*, 2016).

1.2.1.5.2 Efectos fisiológicos del AR

El almidón resistente se ha clasificado como alimento funcional al ser una fuente de fibra dietética, lo que ha atraído mucha atención en las últimas dos décadas debido a sus propiedades funcionales. Este tipo de almidón no afecta la digestión enzimática, por lo que no puede producir glucosa en el cuerpo. Sin embargo, al producir gas y ácidos grasos de cadena corta, la microbiota bacteriana puede fermentar el almidón resistente en el colon (Pourmohammadi *et al.*, 2019).

Este tipo de almidón que resiste a la digestión enzimática es reconocido como un contribuyente significativo a la salud gastrointestinal. El almidón al no ser digerido es

fermentado por microorganismos en el intestino grueso para producir ácidos grasos de cadena corta, incluidos acetato, propionato y butirato (Bird, Brown & Topping, 2000; Brouns, Kettlitz y Arrigoni, 2002) e isobutirato, valerato e isovalerato, estos últimos en menor proporción (Hylla *et al.*, 1998).

En un estudio científico se observó el aumento significativamente la producción colónica de acetato, propionato y butirato en ratas con dieta rica en AR. Este tipo de dieta aumentó la apoptosis en el colon, lo que demuestra la capacidad del AR para controlar el inicio del cáncer de colon (Leu, Hu, Brown & Young, 2009).

El butirato se ha relacionado con el aumento del nivel de glutatión, un antioxidante en la mucosa colónica, mejorando la resistencia del colon a agentes tóxicos en la dieta (Hamer *et al.*, 2009). El consumo del AR también ha demostrado una disminución significativa de los ácidos biliares (ácido cólico, ácido quenodesoxicólico, ácido desoxicólico, ácido litocólico, ácido isolitocólico y ácido ursodesoxicólico) y esteroides neutros totales (coprostanol, colesterol, 4-colesten-3-ona, campesterol, estigmasterol y β -sitosterol) en la materia fecal de adultos sanos después de consumir alimentos experimentales ricos en AR durante 4 semanas (Hylla *et al.*, 1998). En otro estudio se observó una expresión significativa de un "gen regulador del ciclo celular y de la proliferación celular" en pacientes con cáncer colorrectal después de su consumo de 40 g / día de RS durante 2-4 semanas. La expresión del gen se inhibió en sujetos de control (Dronamraju, Coxhead, Kelly & Mathers, 2007).

En particular, el AR juega un papel importante en la reducción de los niveles de glucosa en la sangre posprandial en los primeros 120 minutos, aumenta la saciedad, disminuye el riesgo de obesidad, modifica la sensibilidad a la insulina en pacientes con diabetes tipo II y protege contra la enfermedad renal crónica (Xia *et al.*, 2018). Otros de los beneficios constan en el aumento significativo de poblaciones de lactobacilos, bifidobacterias, estafilococos y estreptococos, disminuyendo la población de enterobacterias en el colon de ratas experimentales (Perera *et al.*, 2010).

Desde el punto de vista fisiológico, el almidón resistente es capaz de modular la cinética de digestibilidad de los nutrientes, lo que posibilita su incorporación en el diseño de productos con menor índice glicémico y menor poder energético. La modulación del metabolismo de la glucosa y los lípidos, así como, las posibles asociaciones con la salud de la microbiota, indican que el almidón resistente podría ser un ingrediente con un gran

potencial en el tratamiento de enfermedades crónicas (Villarreal *et al.*, 2018). Sin embargo para observar los beneficios fisiológicos del consumo de AR, se estima que entre el 10 % y el 20 % de la ingesta diaria de carbohidratos debe realizarse en forma de AR (Alsaffar 2011).

Diferentes organismos, como la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, recomiendan el consumo de 25 g / día de fibra dietética para adultos, recomendación que se basa en la regularización de la función intestinal. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) también ha sugerido una ingesta de 25 g / día de fibra dietética, como se reafirmó en 2007. El consumo diario de fibra en muchos países sigue siendo muy bajo y esto se ha relacionado directamente con el sobrepeso y la obesidad, así como con ciertos tipos de cáncer (por ejemplo, cáncer de colon), diabetes tipo II, trastornos metabólicos (por ejemplo, enfermedad hepática) y enfermedades cardiovasculares (Magallanes-Cruz *et al.*, 2020).

1.2.1.5.3 Métodos de obtención del AR

El almidón es bien conocido por su biocompatibilidad, biodegradabilidad, bajo costo y no toxicidad. A pesar de sus ventajas, el almidón tiene ciertas limitaciones en la industria por su solubilidad en agua, susceptibilidad a altas temperaturas, a pH ácidos o extremos, presentan bajas resistencias a altos esfuerzos cortantes, fácil retrogradación, pérdida de viscosidad y algunos grupos de importancia, por lo que para superar estas deficiencias y para ampliar su aplicación es necesario recurrir a la modificación. Existen diferentes técnicas para modificar el almidón, como la modificación química, la modificación física y la modificación enzimática, sin embargo la más significativa ha sido la modificación química (Haq *et al.*, 2019).

1.2.1.5.3.1 Modificación química

Los tratamientos químicos implican la introducción de grupos funcionales adecuados en la molécula de almidón mediante reacciones de derivatización como eterificación, esterificación, entrecruzamiento y reacciones de injerto o descomposición, y usa para mejorar las propiedades del almidón con el fin de cumplir requisitos de aplicaciones específicas. Una de las reacciones más utilizadas para modificar el almidón es el entrecruzamiento, que está destinada a agregar enlaces intra e intermoleculares en ubicaciones aleatorias de una molécula de almidón.

La reacción de entrecruzamiento altera las propiedades estructurales, fisicoquímicas y fisiológicas del almidón. El efecto del entrecruzamiento sobre las propiedades del almidón depende de la fuente botánica del almidón, la concentración y el tipo de entrecruzamiento, agentes entrecruzantes, así como las condiciones de reacción utilizadas (Wongsagonsup *et al.*, 2014). El trimetafosfato de sodio (STMP), el tripolifosfato de sodio (STPP), la epiclorhidrina (EPCH), el cloruro de fosforilo (POCl₃), una mezcla de ácido adípico y anhídrido acético, y el cloruro de vinilo son algunos de los agentes entrecruzantes más usados actualmente para el entrecruzamiento con almidón. Sin embargo, se sabe que la EPCH es tóxica y la presencia de una pequeña cantidad de su residuo o fracción sin reaccionar puede producir efectos secundarios tóxicos (Gao *et al.*, 2014). Actualmente se propone el trimetafosfato de sodio (STMP) como agente entrecruzante no tóxico porque no tiene efectos adversos en los seres humanos (Woo & Seib, 1997).

Heo, Lee & Chang en el 2017, entrecruzaron almidón de papa con trimetafosfato de sodio / tripolifosfato de sodio. Los resultados indicaron que la reacción química se produjo en el área amorfa sin cambiar el área cristalina en los gránulos de almidón de papa. El almidón entrecruzado mostró un aumento en el contenido de almidón resistente (AR), por lo que el autor sugiere su uso en la industria alimentaria como fibra nutricional alternativa.

Páramo-Calderón *et al.*, (2016) modificaron almidones de las variedades Macho (*Musa paradisiaca* L.) y Roatan (*Musa sapientum* L.) empleando trimetafosfato de sodio (STMP) como agente entrecruzante. Se observaron cambios en las propiedades fisicoquímicas, funcionales y digestibilidad del almidón, como la disminución de la capacidad de hinchamiento y un aumentó significativo de la cristalinidad y fracción resistente más pronunciado en la variedad macho. Los resultados del trabajo indica que el proceso de modificación química a través del entrecruzamiento mejora la estabilidad de la estructura interna del gránulo y aumenta el contenido de almidón resistente, sin embargo, este aumento dependió de la fuente botánica del almidón. Además sugiere que, el uso del plátano como fuente de almidón puede promover la economía regional.

Lim & Seib (1993) estudiaron la preparación de fosfatos de almidón y encontraron que una mezcla de STMP/STPP mostró mejores resultados que usar sólo STMP para preparar almidon entrecruzado. Un nivel de entrecruzamiento adecuado podría proporcionar un hinchamiento de los gránulos sin alteración y, en consecuencia, controlar las propiedades reológicas de los productos alimenticios que contienen almidón. Un alto

grado de entrecruzamiento no siempre es idóneo para mejorar la textura de los productos alimenticios, ya que puede impedir que los gránulos de almidón experimenten un hinchamiento y una formación de viscosidad adecuados (Thomas & Atwell, 1999).

En otro estudio, Wongsagonsup *et al.*, (2014) entrecruzaron almidón de yuca evaluando diferentes niveles de entrecruzamiento (0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0 y 6.0 %) y su aplicación como espesante en sopas empleando una mezcla de STMP/STPP como agentes entrecruzantes. Observando que el nivel al 1.0 % y la sopa que contiene el almidón al 1.0% de entrecruzamiento, exhibió la característica de gel más fuerte, las mayores propiedades de resistencia al cizallamiento, y mejoró las propiedades de textura y la calidad sensorial de las sopas. Lo cual es adecuada su aplicación como agente espesante en productos de sopa.

Hasta ahora, no existe información científica sobre el desarrollo del almidón de plátano variedad macho entrecruzado empleando una mezcla de trimetafosfato de sodio y tripolifosfato de sodio (STMP/STPP) como agentes entrecruzantes para su aplicación en el desarrollo de sopas instantáneas.

1.2.2 Antioxidantes naturales

Otros ingredientes funcionales que han causado gran interés son los compuestos bioactivos. Dentro de los cuales, los fenoles, ácidos fenólicos y flavonoides han sido de mayor interés debido a sus propiedades antioxidantes principalmente. La actividad antioxidante de los compuestos fenólicos han demostrado estar ligadas con efectos fisiológicos positivos en la salud, por lo cual se pueden utilizar como aplicaciones benéficas para la salud humana, ya sea como tratamiento y/o prevención de cáncer (Porrás-Loaiza & López-Malo, 2009). Es por ello que la búsqueda de fuentes vegetales de antioxidantes se han convertido en un foco de interés para muchas investigaciones.

1.2.2.1 Compuestos bioactivos con actividad antioxidante

Dentro de las varias clases y subclases de polifenoles, algunas se definen en función del número de anillos fenólicos que poseen y de los elementos estructurales que presentan estos anillos. Los principales grupos de polifenoles incluyen: ácidos fenólicos, estilbenos, lignanos, alcoholes fenólicos y flavonoides (Quiñones *et al.*, 2012). Los flavonoides

pertenecen a la subclase de polifenoles más abundante dentro del reino vegetal, y se clasifican en función del estado de oxidación del anillo heterocíclico (anillo C) y de la posición del anillo B. Los principales subgrupos de flavonoides incluyen: flavonoles, flavonas, flavanonas, isoflavonas y antocianidinas (Manach *et al.*, 2004).

Los ácidos fenólicos consisten en dos grupos: los ácidos hidroxibenzoicos (ácido protocatéquico, vinílico y gálico) y los ácidos hidroxicinámicos (ácido ferúlico, clorogénico y cumárico). La presencia de más de un grupo hidroxilo y una mayor separación del grupo carbonilo al anillo aromático aumentan la capacidad antioxidante de estos compuestos (Peñarrieta *et al.*, 2014).

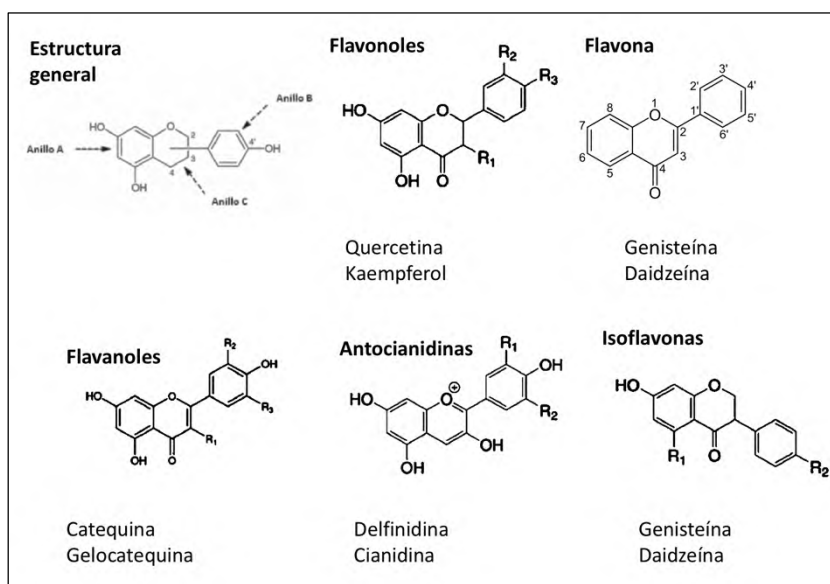


Figura 3. Principales grupos de flavonoides (Limón *et al.*, 2010)

1.2.2.2 Mecanismos de acción de los compuestos antioxidantes

Los antioxidantes deben estar presentes en el organismo en una concentración suficiente para prevenir la acumulación de elementos pro-oxidantes, o también llamado estrés oxidativo. El antioxidante al reaccionar con el radical libre le cede un electrón, oxidándose a su vez y transformándose en un radical libre débil no tóxico, que en algunos casos como el de la vitamina E, puede regenerarse a su forma primitiva por acción de otros antioxidantes (Posada *et al.*, 2003).

En este sentido, los polifenoles son los principales antioxidantes de la dieta, de los cuales los flavonoides como la quercetina por ejemplo, pueden neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS), como el O_2^- , el H_2O_2 o el HClO. La quercetina junto con la miricetina, seguidas por el kaempferol, son los flavonoides que poseen mayor actividad neutralizadora de radicales libres. El grupo fenólico que poseen, captura electrones desapareados de las ROS, generando especies menos reactivas. Los flavonoides actúan como tampones y capturan radicales libres para generar el radical flavínico, el cual es mucho menos reactivo, debido a que en él, los electrones desapareados están deslocalizados. Aunado a esto, los flavonoles como la quercetina pueden quelar iones metálicos de transición como el hierro o el cobre, evitando de esta manera también la formación de las ROS (Binsack *et al.*, 2001; Cotelle *et al.*, 1996; Korkina & Afanasev, 1997; Krinsky, 1992). Los polifenoles pueden inhibir enzimas generadoras de ROS, tal como la Xantina oxidasa y NADPH oxidasa (Orallo *et al.*, 2002). Como consecuencia, los compuestos fenólicos han demostrado poseer, por su actividad antioxidante, efectos vasodilatadores, antitrombóticos, antiinflamatorios y antiapoptóticos, promueve el efecto cardioprotector, efectos antilipémicos y antiaterogénicos (Quiñones *et al.*, 2012). Se han utilizado en la prevención y tratamiento de cáncer, procesos infecciosos, además de estar involucrado en la calidad sensorial de alimentos, tanto naturales como procesados (Porras-Loaiza & López-Malo, 2009).

1.2.3 Moringa oleífera

1.2.3.1 Generalidades de la planta

La *Moringa oleífera*, conocida comúnmente como “moringa” es un árbol pequeño y de crecimiento acelerado que usualmente alcanza de 10-12 m de altura, es originario de los Himalayas, pero ha sido introducido en diferentes lugares (Sánchez-Peña *et al.*, 2013). *M. oleífera* se puede cultivar en cualquier región tropical y subtropical del mundo con una temperatura de alrededor de 25–35 °C (Thurber & Fahey, 2010), sin embargo, el suelo es un factor importante que define el contenido de nutrientes y la fuerza de la planta (Asante, *et al.*, 2014). Esta planta prefiere condiciones de suelo bien drenado y con agua en el subsuelo, aunque es muy adaptable y tolera suelos arcillosos. Se trata de una especie que acepta bastante bien el riego con aguas de desecho, lo que la convierte en una especie idónea para el aprovechamiento de aguas depuradas e incluso de aguas residuales. La

temperatura óptima para el crecimiento de este cultivo oscila de 20 a 40 °C. Aporta una elevada cantidad de nutrientes al suelo, protegiéndolo al mismo tiempo de factores climáticos externos, erosión y desecación en exceso (Paz & Bosque, 2011).

1.2.3.2 Valor nutricional de *Moringa oleífera*

El contenido nutricional puede variar dependiendo de la estación, el clima, la condición del suelo y la variedad de la planta. Todas las partes de la planta de moringa ofrecen compuestos nutritivos y bioactivos que son muy importantes para una dieta saludable (Pinheiro *et al*; 2008).

Tabla 2. Contenido nutricional de las hojas de *Moringa oleífera*
(Valores reportados por 100 g de porción comestible)

Nutrientes	Hojas frescas	Hojas secas	Polvo de hoja
Calorías	92	329	205
Proteína (g)	6.7	29.4	27.1
Grasas (g)	1.7	5.2	2.3
Carbohidratos (g)	12.5	41.2	38.2
Fibra (g)	0.9	12.5	19.2
Vitamina B ₁ (mg)	0.06	2.02	2,64
Vitamina B ₂ (mg)	0.05	21.3	20.5
Vitamina B ₃ (mg)	0.8	7.6	8.2
Vitamina C (mg)	220	15.8	17.3
Vitamina E (mg)	448	10.8	113
Calcio (mg)	440	2185	2003
Magnesio (mg)	42	448	368
Fósforo (mg)	70	252	204
Potasio (mg)	259	1236	1324
Cobre (mg)	0.07	0.49	0,57
Hierro (mg)	0.85	25.6	28.2
Azufre (mg)	-	-	870

Fuente: (Fuglie, 2005) (Alikwe, 2014)

Una característica importante de *Moringa oleífera*, es que se destaca por contener las proteínas en sus hojas, así como minerales, carotenoides, todos los aminoácidos esenciales y vitamina C (Tabla 2 y 3), las cuales están presentes en el árbol prácticamente todo el año (Gopalan *et al*; 1971; Verma *et al*; 1976; Peter, 1979; Freiburger *et al*; 1998). En comparación a muchas plantas que muestran ser fuente rica en proteínas, sin embargo dicho contenido es en la semilla. Además de contar con altos niveles de aminoácidos esenciales, vitaminas y antioxidantes, los estudios indican que el consumo de la moringa no presenta riesgo, pues contiene niveles bajos de factores anti-nutritivos (Palada, 1996). Por todas estas potencialidades, diversas organizaciones internacionales se han motivado para desarrollar investigaciones sobre el contenido nutritivo de hojas de moringa, y sobretodo incorporarlo en productos de alimentación (Sosa, 2012).

Tabla 3. Contenido de aminoácidos en hojas de *Moringa oleífera* (valores reportados por cada 100 g de porción comestible)

Aminoácido	Hojas frescas ^a (mg)	Hojas secas ^b (mg)
Leucina	492.2	1950
Valina	374.5	1063
Lisina	374.5	1325
Fenilalanina	310.3	1388
Isoleucina	299.6	825
Histidina	149.8	613
Treonina	117.7	1118
Metionina	117.7	350
Triptófano	0.85	425

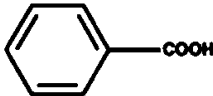
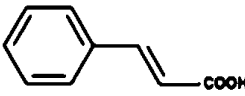
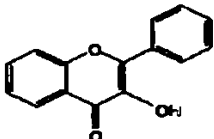
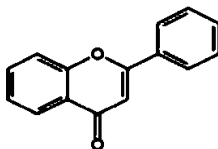
Fuente: Adaptado de: ^aGopalan *et al*; (1971) & ^bFunglie, (2000).

1.2.3.3 Compuestos bioactivos de *Moringa oleífera*

En los últimos años se ha demostrado que una dieta rica en polifenoles vegetales puede mejorar la salud y disminuir la incidencia de enfermedades cardiovasculares. *Moringa oleífera* proporciona numerosos fitonutrientes en la dieta, incluidos los flavonoides,

que son metabolitos secundarios de las plantas con efectos beneficiosos para la salud, como la prevención del daño al ADN de las células normales y la promoción de la apoptosis de las células cancerosas, lo que reduce la carga de enfermedades no transmisibles (ENT) (Lin *et al.*, 2018). Es rica en fitoesteroles, los cuales son precursores de las hormonas; estos compuestos aumentan la producción de estrógenos, que a su vez estimula la proliferación de los conductos de la glándula mamaria para producir leche (Titi & Estiasih, 2013). Amaglo *et al.*; (2010) identificaron en *Moringa oleífera* un perfil de flavonoides relativamente complejo que consta de glucósidos, rutinósidos, malonilglucósidos y trazas de acetilglucósidos de kaempferol, quercetina e isoramnetina.

Tabla 4. Compuestos bioactivos presentes en hojas de *Moringa oleífera*

		Estructura básica	Compuestos
Ácidos fenólicos	<i>Hidrobenzoicos</i>		Gálico Vainílico Elágico Sríngico
	<i>Hidroxicinámicos</i>		Clorogénico Ferúlico p-cumárico
Flavonoides	<i>Flavonoles</i>		Quercetina Kaempferol Isoramnetina Miricetina Morin
	<i>Flavonas</i>		Acacetina

Nambiar *et al.*, 2005; Manguro & Lemmen., 2007; Lako *et al.*, 2007; Sultana & Anwart., 2008; Verma *et al.*, 2009; Amaglo *et al.*, 2010.

Dada su rica fuente de compuestos bioactivos y características nutricionales, existe una creciente exploración y comprensión de moringa con referencia a la salud humana, por

lo que en muchas partes del mundo esta planta es utilizada como fortificante de alimentos. Se ha explorado el diseño y formulación de diversos alimentos, desde galletas (Manaois *et al.*, 2013) que han informaron un aumento en el contenido de proteína de hasta aproximadamente 14 %.

También se ha aplicado el uso de la harina de hojas de *Moringa oleífera* (HMO) en el desarrollo de productos lácteos como el yogur. Reportando que el yogur una mejora en los atributos sensoriales del yogur fortificado con HMO al agregar frutas como plátano, camote y/o aguacate (Oyeyinka & Oyeyinka., 2018).

Deviseti *et al.*, 2016 elaboraron un bocadillo listo para consumo, el cual mostró un alto contenido de proteínas (21.6 g / 100 g) y fibra dietética (14.8 g / 100 g) y un bajo contenido de grasa de 3.7 g / 100 g. Los flavonoides, como la catequina, el kaempferol, la rutina y la luteolina estaban presentes tanto en las harinas como en los bocadillos preparados. La calidad sensorial general indicó que los bocadillos tenían atributos de textura aceptables. Otros informes sobre pan enriquecido con harina de hojas de moringa informaron un aumento de aproximadamente 17% y 88% en el contenido de proteína y fibra bruta respectivamente (Chinma *et al.*, 2014).

Páramo-Calderón *et al.*, 2019 elaboraron tortillas adicionadas con harina de hojas de *Moringa oleífera*, aumentando el contenido de proteínas, contenido de fenoles totales y actividad antirradical con respecto a la tortilla control. La fortificación de la tortilla mostró aumentó en el contenido de ácido oleico, linoleico y linolénico. Las propiedades de textura consistieron en cohesividad y adhesividad, las cuales no mostraron cambios importantes en la masa y las tortillas entre las diferentes formulaciones sin diferencias significativas ($p < 0.05$).

1.2.3.4 Efectos fisiológicos de *Moringa oleífera*

Las hojas de *Moringa oleífera* se ha utilizado como una fuente de alimento alternativa para combatir la desnutrición, especialmente entre niños y bebés. Se ha informado que las hojas de moringa contienen cantidades apreciables de vitamina A , C y E, fenoles totales, proteínas, calcio, potasio, magnesio, hierro, manganeso y cobre (Hekmat *et al.*, 2015). También son buenas fuentes de fitonutrientes como los carotenoides , los tocoferoles y ácido ascórbico (Saini *et al.*, 2016). Se sabe que estos nutrientes eliminan los radicales libres cuando se combinan con una dieta balanceada y pueden tener efectos

inmunosupresores (DanMalam *et al.*, 2001). Se ha demostrado el potencial antioxidante de las hojas de moringa, el cual podría atribuirse a la presencia de contenido fenólico total, contenido total de flavonoides, carotenoides, licopeno, ácido ascórbico y antocianinas en las hojas (Vats & Gupta, 2017).

En un estudio Chumark *et al.*, 2008 demostró que el extracto de hoja de moringa puede disminuir el inicio y propagación de la peroxidación lipídica. De manera similar, se ha reportado que el consumo diario de polvo de hoja de Moringa (7 g) por mujeres posmenopáusicas durante 3 meses aumentó significativamente los niveles séricos de retinol, ácido ascórbico, GSH y SOD, con una disminución en nivel sérico de malondialdehído (Kushwaha *et al.*, 2014). Los estudios anteriores sugieren que la moringa posee fuertes propiedades antioxidantes y, por lo tanto, puede ser beneficiosa para la prevención de enfermedades inducidas por estrés oxidativo.

Jung, 2014 informó en un estudio, que el tratamiento con extracto acuoso de hojas de moringa inhibió el crecimiento de células tumorales, indujo apoptosis y disminuyó los niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS) en las células de cáncer de pulmón y algunos otros tipos de células cancerosas, lo que sugiere que las hojas de moringa tienen el potencial de disminuir la proliferación e invasión células cancerosas.

Se ha investigado también la actividad antiinflamatoria del extracto etanólico de las vainas de *Moringa oleífera*, contra proinflamatorios secretados por células de macrófagos inducidos por lipopolisacáridos. El extracto tiene la capacidad de inhibir la expresión factores proinflamatorios (Muangnoi *et al.*, 2012). El extracto de hoja de moringa ha demostrado acción protectora contra la hepatotoxicidad inducida en ratones de una manera dependiente de la dosis (Karthivashan *et al.*, 2015).

Diversas investigaciones se han centrado en el estudio de las propiedades antidiabéticas de *Moringa oleífera* (Ma *et al.*, 2018). Se ha evidenciado la reducción del nivel de glucosa en sangre después de la administración oral del extracto de hoja de moringa. Este hipoglucémico se comparó con la reducción ejercida por un fármaco de referencia, encontrando efectos similares.

En otro estudio se investigó el efecto de la administración oral de polvo de hoja de moringa sobre la tolerancia a la glucosa en ratas inducidas con diabetes tipo II. Los resultados indicaron una mejor tolerancia a la glucosa y redujeron el vaciado gástrico. Este comportamiento puede deberse a la presencia de quercetina-3-glucósido y al contenido de

fibra. De acuerdo a Muhammad *et al.*, 2016 menciona que el mecanismo detrás del efecto hipoglucemiante de la moringa es la inhibición de la glucosa intestinal, una mejor secreción de insulina y una disminución de la resistencia a la insulina.

En humanos, la ingesta diaria de cápsulas de polvo de hoja de moringa (4 g) durante 1 mes en sujetos con diabetes tipo II mostró una disminución en la presión arterial sistólica y diastólica de 5 mmHg. Aunque esta disminución de la presión arterial no fue significativa, un metaanálisis reciente ha demostrado que cada disminución de 5 mmHg en la presión arterial sistólica produce una disminución del riesgo cardiovascular y la mortalidad por todas las causas (Bundy *et al.*, 2017; Taweerutchana *et al.*, 2017).

Existe evidencia científica que ha demostrado exhibir varias propiedades medicinales de *Moringa oleifera* que se atribuyen a sus fitoquímicos, aunque los mecanismos subyacentes siguen sin estar claros. Por tanto, futuros estudios deberían explorar los posibles mecanismos de acción de estos fitoquímicos y el potencial de considerar a la planta *M. oleifera* como un alimento funcional para la prevención y manejo de enfermedades crónicas (Ma *et al.*, 2018).

Sin embargo se requiere de un alimento vehículo para poder hacer llegar los beneficios de los ingredientes funcionales al consumidor, en ese contexto, una de las estrategias en el diseño de nuevos alimentos se centra en la búsqueda de un producto que represente alta demanda de consumo. Por lo cual, las sopas instantáneas podrían ser una propuesta como "alimento vehículo" viable, debido a que son productos de fácil acceso y su consumo va en aumento.

1.3 Sopas instantáneas

El enfoque hacia el desarrollo y mejoramiento de sopas instantáneas nutricionalmente, ha surgido porque el consumo de sopas semanalmente tan sólo en México ha ido en aumento desde 1988, donde los mexicanos consumían 73 mil 920 sopas a la semana, procedentes de Estados Unidos. En el 2004, la cifra subió a 134 millones 600 mil sopas a la semana, para una venta de 4.5 millones de sopas al día; de hecho, el 15 % del consumo mundial del total de sopas y caldos que exporta Estados Unidos, México compra el 67 %. De acuerdo a la Asociación Mundial de Fideos en el 2020, México se posiciona en el lugar 15° a nivel mundial y como el 2° en latinoamérica con mayor consumo de sopas instantáneas. Los principales consumidores de este tipo de sopas se ubican

principalmente en el DF, Estado de México, Guadalajara, Sinaloa, Monterrey, Sinaloa, Nayarit, Sonora, Veracruz y Chiapas (El poder del consumidor, 2008). Las sopas instantáneas han ganado el mercado que han perdido auténticos alimentos como el frijol, cuyo consumo por persona cayó de 18 kg al año en 1994 a 9.9 kg en 2003, al tiempo que caía el consumo de maíz en 30 %. Este tipo de producto es definido como un preparado industrial en envases cuyo contenido está deshidratado. El invento se debe al químico orgánico Justus von Liebig, en los años 1850. Entre 1872 y 1873, el alemán Carl Heinrich Knorr y el suizo Julius Maggi perfeccionaron y comercializaron las sopas deshidratadas (sopas instantáneas), normalmente obtenidas por liofilización, de las que existe una gran variedad.

Es importante comentar que aunque las sopas instantáneas pueden ser una opción en el rubro del alimento rápido los niveles nutrimentales no son los óptimos para una alimentación sana (Tabla 5), por su alto contenido de carbohidratos digeribles y su aporte calórico.

Otro ingrediente perjudicial es el glutamato monosódico, utilizado como potenciador de sabor, el cual ha sido relacionado con efectos cancerígenos. El consumo de esta sustancia bloquea los mecanismos inhibidores del apetito, generando hambre ansiosa. A estos riesgos se suma el casi nulo valor nutricional de estas sopas, al ser un producto abundante en carbohidratos refinados y con bajo aporte de fibra, su consumo regular propicia obesidad y se asocia al riesgo de contraer enfermedades crónico-degenerativas (El poder del consumidor, 2008).

En este sentido, el consumo masivo de sopas instantáneas con las características ya mencionadas, han motivado a la innovación tecnológica a desarrollar sopas instantáneas mejoradas, como un alimento con nuevas características, ofreciendo beneficios nutricionales y funcionales. A continuación se mencionan algunos trabajos en el intento por mejorar este tipo de producto:

Tabla 5. Composición química de sopas instantáneas comerciales

Contenido / Tipo de sopa	Instantánea	sencilla	integral
kcal	274 -334	140	150
Lípidos (g)	6 - 7	5	6
Proteínas (g)	10 - 14	4	4
Carbohidratos (g)	40 - 45	24	24

Fuente: Laboratorio Nacional de Protección al Consumidor (México, 2008).

García *et al.*, 2007 desarrollaron una preparación instantánea a partir de *Arracacia xanthorrhiza* con una viscosidad promedio (2800 cPs), caracterizada por presentar un alto contenido de proteína (10.76 %), carbohidratos (58.3 %), grasa (10.07 %) y bajo contenido de humedad (5.75 %), fibra dietética (8.53 %) y almidón resistente (2.30-2.38 %). La digestibilidad *in vitro* fue alta (79.20 %), demostrada por la fácil digestión del producto elaborado.

Por otra parte, Maria & Yoon (2017) evaluaron el rendimiento de la incorporación de almidón resistente comercial tipo II (AR2) y almidón resistente tipo III (AR3), durante el procesamiento de fideos instantáneos fritos en dos tipos de sistemas. Ellos observaron pérdidas que oscilaron de 18 hasta 30 % del almidón resistente incorporado. Con lo cual se fundamenta que el uso de este tipo de almidones resistente de manera nativa no son viables para su uso en el desarrollo de productos que requieran ser procesados térmicamente, puesto que la fracción es susceptible a procesos térmicos. Describieron también que el producto presentaba apariencia grasosa, lo cual no es apetecible.

Punia *et al.*, 2019 evaluó el comportamiento reológico y la calidad de fideos de trigo incorporando almidón resistente tipo IV de cebada. El reemplazo del almidón de trigo provocó cambios en parámetros importantes como la firmeza, elasticidad, cohesión y masticabilidad, logrando hasta un 20 % de incorporación de AR para producir fideos de calidad aceptable. Las características reológicas y de textura en el desarrollo de nuevos productos son parámetros de importancia para la aceptación del consumidor, principalmente en la elaboración fideos.

Sin embargo hasta el momento no existe evidencia científica que indiquen el desarrollo de una formulación de sopa instantánea enriquecida con almidón resistente tipo

IV y antioxidantes, siendo que este tipo de productos que abarcan el mercado hasta el momento, no ofrecen algún valor nutricional, y que de acuerdo a la Asociación Mundial de Fideos en el 2020, México es el décimo quinto país con mayor consumo de sopas instantáneas y el segundo a nivel Latinoamérica. Por lo cual surge la necesidad de mejorar este tipo de productos alimenticios.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El consumo de sopas instantáneas ha ido en aumento desde 1988 hasta el año 2015 de 73,000 a poco más de 31 millones de sopas consumidas semanalmente tan sólo en México, siendo estos datos relacionados con información obtenida del observatorio económico mundial, donde las gráficas muestran a México como el segundo país importador de sopas y caldos, las cuales no ofrecen algún valor nutricional y por el contrario, poseen alto contenido de sodio y otros aditivos. Siendo que el tipo de productos que abarcan el mercado no ofrecen algún valor nutricional o funcional, sino que de lo contrario, ya existe evidencia científica donde se relaciona el consumo de este tipo de sopa con el desarrollo del síndrome metabólico de acuerdo a Shin *et al.*, 2014.

Por consiguiente, la tendencia mundial en la alimentación señala el interés de los consumidores por alimentos que además del valor nutritivo aporten beneficios a la salud (Health-Canada, 1998), por lo que las sopas instantáneas requieren ser mejoradas nutricionalmente debido a su alto consumo.

3 JUSTIFICACIÓN

Se ha demostrado que el consumo de AR interviene en la reducción de la respuesta glucémica, y la concentración de lípidos en sangre, favoreciendo condiciones fisiológicas para prevenir enfermedades como diabetes mellitus, obesidad, enfermedad cardiovascular y síndrome metabólico (Olvera-Hernández *et al.*, 2010).

Por su parte, la harina de hojas de *Moringa oleífera* puede servir como un buen complemento para una nutrición adecuada, debido a su contenido de proteína de calidad (aminoácidos esenciales), y ácidos grasos esenciales. Además, la ingesta de moringa podría reducir el riesgo de problemas relacionados con la oxidación debido a la presencia de algunos polifenoles y flavonoides, de manera que ambos ingredientes constituyen una alternativa para ser incorporados como ingredientes funcionales en la elaboración de alimentos.

De acuerdo a lo anterior, se propuso el desarrollo de una sopa instantánea con propiedades funcionales mediante la incorporación de harina de moringa debido a sus cualidades nutricionales y de AR debido a los beneficios que produce en la salud.

4 HIPÓTESIS

La incorporación de almidón resistente tipo IV y la harina de *Moringa oleífera* favorecerá la elaboración de sopas instantáneas.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una sopa instantánea con alto contenido de carbohidratos no digeribles y compuestos antioxidantes a partir de la incorporación de almidón resistente tipo IV y harina de hojas de *Moringa oleífera*.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar almidón resistente tipo IV a partir de almidón de plátano por entrecruzamiento.
- Determinar el contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante de la harina de *Moringa oleífera*
- Desarrollar diferentes formulaciones de la sopa instantánea incorporando AR tipo IV y harina de hojas de *Moringa oleífera* como ingredientes funcionales.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Se cosecharon hojas verdes de *Moringa oleífera* de árboles de edad joven y adultos ubicados en la Universidad del Papaloapan - campus Tuxtepec, las cuales fueron empleadas para elaborar harina. El plátano (*Musa paradisiaca* L.) variedad macho se utilizó en estado inmaduro, el cual fue adquirido con un proveedor local de la Cuenca del Papaloapan, ubicado en San Juan Bautista Tuxtepec, Oaxaca.

Los reactivos utilizados como el trimetafosfato de sodio (TMFS), tripolifosfato de sodio (TPFS), sulfato de sodio, 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH), persulfato de potasio, reactivo de Folin- Ciocalteu, carbonato de sodio, ácido gálico y Trolox se adquirieron con Sigma Aldrich. El hidróxido de sodio, ácido clorhídrico, metanol absoluto y éter de petróleo se utilizaron en grado analítico.

6.2 Metodología

El diagrama experimental propuesto se muestra en la Figura 4.

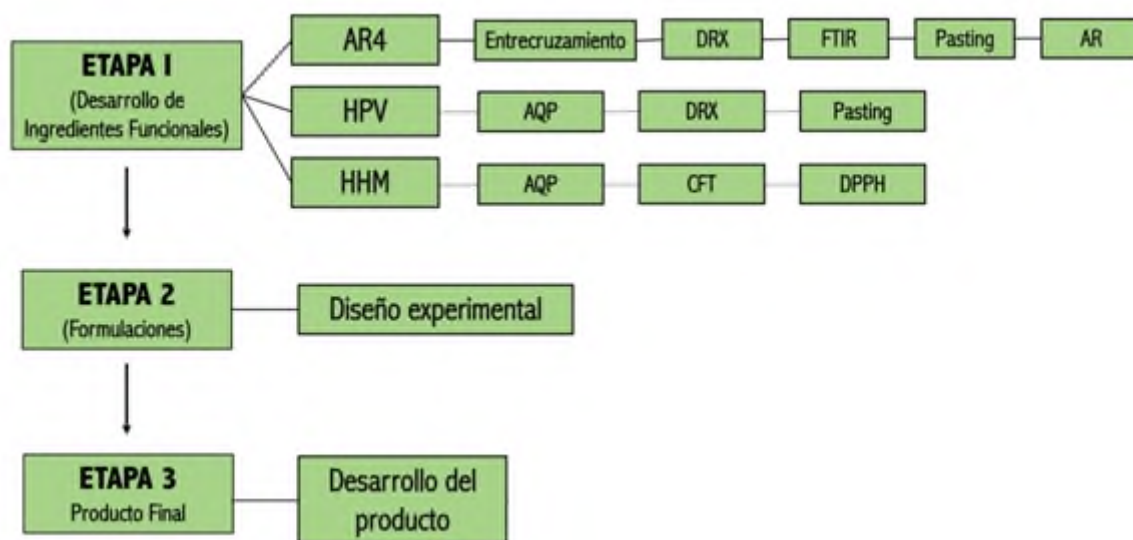


Figura 4. Diagrama de la metodología general

6.3 Obtención de los ingredientes funcionales

6.3.1 Harina de Moringa oleífera

Se deshidrataron hojas de moringa (previamente desinfectadas) por lecho fluidizado a una temperatura de 55 °C, velocidad del aire a 1.0 m/s y el tiempo de secado de 60-80 min de acuerdo con las condiciones establecidas por Pérez, (2013). Por último se pulverizaron con ayuda de un molino de café (KRUPS, GX410011) y se tamizaron utilizando una malla No. 50. La harina obtenida fue almacenada en bolsas metálicas tricapa y selladas hasta uso posterior.

6.3.2 Harina de plátano

Para la obtención de la harina de plátano, se rebanó pulpa fresca con un espesor aproximado de 1-2 mm y se sumergieron en solución de ácido cítrico (0.3 %) para evitar el oscurecimiento del fruto, posteriormente se secaron a 50 °C en un secador de bandejas (SUSESA, México) durante 12 h. Las rodajas deshidratadas fueron pulverizadas y posteriormente tamizadas empleando una malla No 50. La harina obtenida fue almacenada en recipientes herméticos hasta su posterior uso.

6.3.3 Aislamiento del almidón

El aislamiento del almidón de plátano verde se realizó siguiendo la metodología reportada por Flores-Gorosquera *et al.*, (2004) con ligeras modificaciones. Los trozos de la pulpa del plátano (2-3 cm de largo) se colocaron en una solución antioxidante de ácido cítrico al 0.3 %, para evitar oscurecimiento de la pulpa, posteriormente los frutos se molieron en una licuadora tipo industrial (Waring, mod CB15, Waring, USA) a velocidad baja. La mezcla resultante se filtró utilizando tamices de malla No. 50 (300 µm), 100 (150 µm), 270 (53 µm) y 325 (45 µm); en cada tamiz se realizó un lavado hasta que el líquido de salida no presentara residuo aparente. La suspensión obtenida fue decantada eliminando el sobrenadante, y el sedimento fue secado a 45 °C durante 24 h.

6.3.4 Modificación química del almidón (Entrecruzamiento)

El entrecruzamiento del almidón se llevó a cabo siguiendo el método de Seib y Woo (1999), con algunas modificaciones. Se preparó una mezcla en una relación de almidón de plátano nativo (50 g), trimetafosfato de sodio (2.98 g), tripolifosfato de sodio (0.3 g), sulfato de sodio (2.5 g) y agua (100 mL); y se trabajó a condiciones alcalinas (pH 11.5) empleando NaOH 1 M como ajustador de pH, a 45 °C por 3 h continuas, utilizando una plancha con agitación magnética. Concluido el tiempo, la suspensión se neutralizó a pH 6.5 adicionando HCl 1 M. El almidón se recuperó por centrifugación (Heraus Megafuge, 16 R; Waltham, USA) a 4000 rpm x 10 min, realizando lavados con agua hasta no observar residuo aparente y fue secado a 45 °C por 12 h, para posteriormente pasarlo por una etapa de molienda con ayuda de un molino de café (KRUPS, mod. GX410011) y finalmente tamizado con ayuda de una malla No. 100. El almidón obtenido fue almacenado en recipientes herméticos hasta su uso posterior.

6.4 Caracterización de los ingredientes funcionales

6.4.1 Harina de plátano

6.4.1.1 Análisis químico proximal

En el análisis químico proximal de la harina de plátano se determinó el contenido de humedad (método 14.004 de la AOAC, 1990), lípidos (método 7.056 de la AOAC, 1989) y cenizas (método 32.10 de la AACC, 2000). El resultado se obtuvo aplicando las respectivas ecuaciones para cada determinación (Apartado 6.4.3.1.) y se reportó por triplicado.

6.4.1.2 Perfil de pasting

Para evaluar el perfil de pasting se empleó un reómetro (TA Instruments, Discovery HR-2 Hybrid; New Castle, USA) con geometría celda de pegado. Se preparó una dispersión de almidón al 10% (p/v) en base seca y se transfirieron 30 mL a la celda de almidón del reómetro. La muestra se sometió a un ciclo de calentamiento-cocción-enfriamiento. La temperatura inicial fue de 30 °C la cual se mantuvo por 60 s, posteriormente se realizó un calentamiento a una velocidad de 15 °C/min hasta 90 °C, manteniendo esta temperatura durante 360 s y finalmente se enfrió a una velocidad de 30 °C/min hasta alcanzar 30 °C,

manteniéndose a esa temperatura por 420 s. La prueba se realizó a una velocidad de corte de 16.8 s^{-1} . Se utilizó el software TA Instrument Trios versión 4 (New Castle, USA) para obtener los valores de viscosidad con respecto al tiempo y la temperatura..

6.4.1.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX)

Para obtener los patrones de difracción de rayos X se empleó un difractómetro de rayos X (Bruker D8-Advance) de ángulo ancho, equipado con una fuente de cobre operado a 40 KV y 30 mA, produciendo una radiación de $\text{CuK}\alpha$ con una longitud de onda de 1.54 \AA . Los datos fueron colectados en un intervalo de 5 a 50° cada 0.1° , con una velocidad de barrido de 60 s° .

6.4.2 Almidón resistente tipo IV

6.4.2.1 Análisis químico proximal

En el análisis químico proximal del almidón nativo se determinó el contenido de humedad (método 14.004 de la AOAC, 1990), lípidos (método 7.056 de la AOAC, 1989) y cenizas (método 32.10 de la AACC, 2000). El resultado se obtuvo por triplicado aplicando las respectivas ecuaciones para cada determinación (Apartado 6.4.3.1.).

6.4.2.2 Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Para explorar la organización estructural del almidón entrecruzado, se realizó un estudio empleando un espectrofotómetro FTIR (DYNASCAN, Spectrum 100, Perkin Elmer, Shelton USA) utilizando un interferómetro de reflectancia total atenuada (ATR). Los espectros fueron obtenidos con una resolución de 4 cm^{-1} , en un intervalo de $4000 - 515 \text{ cm}^{-1}$.

6.4.2.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Las propiedades térmicas del almidón resistente fueron estudiadas usando un calorímetro diferencial de barrido (TA Discovery, DSC250; New Castle, USA) por el método propuesto por Paredes-López *et al.*, (1994). Se pesaron 2 mg de muestra (en base seca,

mínimo de tres réplicas) dentro de una charola de aluminio, se le adicionaron 7 μ l de agua desionizada. La charola se selló herméticamente y se dejó equilibrar por espacio de 1 h antes de realizar el análisis. Como referencia se utilizó una charola vacía. La muestra se sometió a un programa de calentamiento en un intervalo de temperatura de 30 a 140 °C y una velocidad de 10 °C/min. La temperatura de inicio (T_i), temperatura de gelatinización (T_p), temperatura final (T_f) fueron obtenidas directamente del análisis del software TA Instruments OS/2 versión 2.1.

6.4.2.4 Perfil de pasting

Para la evaluación del perfil de pasting, se empleó la técnica descrita anteriormente en la sección 7.4.1.2.

6.4.2.5 Análisis por difracción de rayos X

Para el análisis por difracción de rayos X, se empleó la técnica descrita anteriormente en la sección 7.4.1.3.

6.4.2.6 Determinación de almidón resistente (AR)

Se utilizó un Kit MEGAZYME basado en el método aprobado por la AACC 32-40.01. Cada sub-muestra de 100 mg se expusieron a las enzimas α -amilasa y amiloglucosidasa en un baño de agua con agitación a 37 °C durante 16 h. Después, se centrifugó y decantó, para obtener un sedimento que contenía el AR. Posteriormente se disolvió en KOH 2 M en un baño de agua helada con agitación magnética vigorosa. La solución se neutralizó luego con un tampón de acetato y el almidón del sedimento redisolto se hidrolizó a D-glucosa usando amiloglucosidasa. La D-glucosa se trató con el reactivo de oxidasa/peroxidasa (GOPOD) y se midió una longitud de onda de 510 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo Scientific, Mod. Genesys 10 S VIS, USA). Los valores de absorbancia se usaron para calcular el contenido de AR de las submuestras según lo descrito por el proveedor.

6.4.3 Harina de Moringa oleífera

6.4.3.1 Análisis químico proximal

En el análisis químico proximal se determinó el contenido de humedad (método 14.004 de la AOAC, 1990), proteínas (método 2.057 de la AOAC, 1990) utilizando un factor de conversión para cada muestra, lípidos (método 7.056 de la AOAC, 1989) y cenizas (método 32.10 de la AACC, 2000). El resultado se obtuvo aplicando las respectivas ecuaciones para cada determinación, y se reportó por triplicado.

Ec.2

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Muestra húmeda (g)} - \text{Muestra seca(g)}}{\text{Muestra húmeda}} \times 100$$

Ec.3

$$\% \text{ Proteínas} = \frac{V * N * 0.014}{M} \times F \times 100$$

V = Volumen de HCl empleado en la titulación en cm³

N = Normalidad del HCl empleado

M = Masa de la muestra en gramos en base seca

0.014 = Miliequivalente del nitrógeno

F = Factor de conversión (6.25 para muestras de harina de moringa y plátano)

Ec.4

$$\% \text{ Lípidos} = \frac{\text{Peso matraz con grasa} - \text{Peso Matraz}}{\text{Muestra en base seca}} \times 100$$

Ec.5

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Cenizas (g)}}{\text{Muestra en base seca}} \times 100$$

6.4.3.2 Determinación del contenido de fenoles totales (CFT)

La extracción de compuestos antioxidantes se realizó pesando 250 mg (sólidos secos) de la muestra (en este caso la harina de moringa), y mezclándolo con 10 mL de solución etanol-agua (80:20, v/v), el cual se sumergió en un baño ultrasónico (Cole Parmer, mod. 8892) durante 30 min a 25 °C. La solución fue centrifugada a 3000 rpm durante 10 min a 20 °C, el sobrenadante se depositó en frasco ámbar, sellado y almacenado a -5 °C hasta su uso posterior.

La cuantificación de fenoles totales se realizó empleando el método Folin-Ciocalteu, de acuerdo a lo descrito por Chumark *et al.*, 2008. 100 µL de extracto se mezcló con 6 mL de agua destilada, agitándose con ayuda de un vortex (Labnet International Inc., mod. S0200) por 10 s. A continuación se adicionaron 500 µL del reactivo Folin-Ciocalteu agitándolo nuevamente y manteniendo en reposo por 5 min; se agregaron 1.5 mL de una solución acuosa de Na₂CO₃ al 20 % p/v seguido de una agitación con vortex por 1 s, y por último, la mezcla fue aforada a 10 mL con agua destilada y agitada. La mezcla se dejó reposar durante 2 h en oscuridad a 25 °C. Concluido el tiempo, la muestra fue sometida a una lectura espectrofotométrica a 765 nm (Perkin Elmer, mod. Lambda 25, Alemania). Se utilizó como blanco una mezcla preparada con todos los reactivos a excepción de la muestra, la cual fue sustituida por el disolvente de extracción.

Se empleó una curva de calibración construida a partir de una solución stock (10 mL) de ácido gálico con el disolvente de extracción (etanol-agua; 80:20, v/v) a 1 mg/mL. Se realizaron diluciones para obtener concentraciones de 0.8, 0.4, 0.2, 0.1 y 0.05 mg/mL. Los resultados se expresan en miligramos equivalentes de ácido gálico por cada 100 g de base seca del extracto (mg EAG / 100 g bs).

6.4.3.3 Determinación de la actividad antirradical (AAR) por ensayo DPPH

Para la determinación de la actividad antirradical por DPPH, se pesaron 2 mg de 1,1- difenil-2-picrilhidrazilo (DPPH) y se aforó a 100 mL con metanol. Se verificó que la absorbancia de la mezcla midiera 0.700 ± 0.05 a una longitud de onda de 517 nm en un espectrofotómetro. A continuación se mezclaron 3.9 mL de la solución de DPPH (1,1- difenil-2-picrilhidrazilo) con 100 µL de extracto, de acuerdo al método descrito por Siddhuraju & Becker, (2003). La mezcla fue agitada con ayuda de un vortex (Labnet

International Inc., mod. S0200) y se dejó reposar durante 90 min a 25 °C en oscuridad. Una vez transcurridos el tiempo, la absorbancia fue medida a 517 nm en un espectrofotómetro (Perkin Elmer, mod. Lambda 25, Alemania), utilizando como blanco una mezcla de 3.9 mL DPPH y 100 µL del disolvente de extracción (etanol – agua; 80:20, v/v).

Se empleó una curva de calibración construida a partir de una solución stock (10 mL) de TROLOX ((±)-6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid) con el disolvente de extracción (etanol-agua; 80:20, v/v) a 1 mg/mL. Se realizaron diluciones para obtener concentraciones de 0.8, 0.4, 0.2, 0.1 y 0.05 mg/mL. Para calcular el % de inhibición se aplicó la Ec. 6, expresando los resultados como miligramos equivalente de Trolox por cada 100 g de base seca del extracto (mg ET/100 gbs).

Ec. 6.

$$\% AAr = \frac{1 - Am}{AR} \times 100$$

Donde:

AAr = Actividad Antiradical.

Am = Absorbancia de muestras.

6.5 Diseño experimental

Los factores a evaluar fueron harina de moringa “**HMO**” (empleando un límite superior del 25 %, que representa el máximo nivel de sustitución), harina de plátano verde “**HPV**” (empleando un límite inferior del 15 % y 100 % como límite superior) y almidón resistente “**AR**” (límite superior de 60 %, de acuerdo a la ingesta recomendada), los cuales en conjunto representan el 28.2 % del total de la masa (Tabla 6).

Para evaluar el efecto de la incorporación de AR y harina de moringa (HHM), se obtuvo una matriz de formulaciones con ayuda de un diseño de mezclas, empleando el software Minitab 18 (Tabla 7).

Tabla 6. Representación en porcentaje de cada ingrediente con respecto a la masa.

Ingredientes	Porción (g)	Porcentaje
Huevo	49	27.6 %
Ajo	1	0.56 %
Pimienta negra	1	0.56 %
Pimienta blanca	1	0.56 %
Sal	5	2.82 %
Tomillo	0.250	0.14 %
Agua	20	11.28 %
Sémola de trigo	50	28.2 %
Harina de plátano verde	50	28.2 %
Total	177.25	100 %

Tabla 7. Formulaciones de sopas

Corrida	Type	A _(HMO)	B _(AR)	C _(HPV)
1	1	0	0	100
2	1	25	0	75
3	1	0	60	40
4	1	25	60	15
5	2	0	30	70
6	2	12.5	0	87.5
7	2	25	30	45
8	2	12.5	60	27.5
9	0	12.5	30	57.5
10	-1	6.25	15	78.75
11	-1	18.75	15	66.25
12	-1	6.25	45	48.75

HMO: Harina de Moringa oleifera, AR: Almidón resistente, HPV: Harina de plátano verde

6.6 Elaboración de sopas instantáneas

6.6.1 Etapa I. Elaboración de masa para la pasta

Para obtener la pasta tipo fideo, primeramente se cernieron los ingredientes secos: 50 g de ST (sémola de *T. Durum*), 50 g de HPV (harina de plátano verde) e ingredientes deshidratados (1 g de ajo, 1 g de pimienta negra, 1 g de pimienta blanca, 0.250 g de tomillo y 5 g de sal); seguido de los ingredientes líquidos: 49 g de huevo y 20 mL de agua purificada. Se mezcló de forma manual hasta formar una masa, la cual se amasó durante 15 min y se dejó en reposo 30 min a temperatura ambiente cubierta con plástico adherente. Posteriormente, la masa se pasó a través de los rodillos de la máquina para pasta (Imperia Mod. 150) iniciando con el espesor de 5 mm, la lámina obtenida se pasó por los rodillos laminadores con espacios progresivamente más pequeños hasta alcanzar un espesor final de 2 mm. Al finalizar, la masa laminada se pasó por los rodillos de corte de fideos.

6.6.2 Etapa II. Cocción y secado de la pasta

Los 177 g de fideos crudos se sometieron a cocción durante un promedio de 5-6 min en agua condimentada hirviendo (5 g sal, 25 g cebolla y 2.2 g de hoja de laurel). Posteriormente, se pesaron 50 g de pasta cocida y se adicionaron 750 mg de una mezcla de condimentos en polvo (ajo, orégano, pimienta negra, pimienta blanca, chile, romillo y sal) para finalmente ser sometidos a secado en un secador de charolas a 50 °C durante 4 h. Las sopas tipo fideo deshidratadas, fueron almacenadas en una bolsa metálica tricapa y selladas para su posterior uso.

6.6.3 Etapa III. Reconstitución de la sopa

La reconstitución de la sopa, consistió en colocar la muestra (15 g) en un vaso de cartón y adicionar 70 mL de agua; posteriormente se calentó en un horno de microondas comercial (LG mod. MH 1449C /00, México) durante 3.5 min en la máxima potencia.

6.7 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos, se utilizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con un nivel de significancia $\alpha=0.05$. Para determinar las diferencias

estadísticas significativas entre las muestras se utilizó una prueba de comparación múltiple de Tukey. Todas las muestras se analizaron por triplicado ($n=3$), y se empleó el software Minitab 18.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Caracterización de los ingredientes funcionales

7.1.1 Harina de Moringa oleífera

7.1.1.1 Análisis químico proximal

Se realizó la caracterización química proximal en tres lotes, debido a que el lote 1 corresponde a hojas de árboles de mayor edad cosechadas en invierno, lote 2 corresponde a hojas de árboles jóvenes cosechadas en invierno y el lote 3 corresponde a hojas de árboles de mayor edad cosechadas en verano. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

El contenido de humedad es un parámetro de importancia que influye en la conservación de muchos alimentos, y se debe ubicar dentro de los estándares establecidos por las normas legales. En este sentido, el contenido de humedad cuantificado para los tres lotes fue menor a lo reportado por Solano-García, 2017 (5.17 g / 100 g.s.s.); y Páramo-Calderón *et al.*, (2019) (4.05 g/100 g.s.s). Estos valores se encuentran dentro de los límites permisibles (15 % b.s., como máximo) de acuerdo a lo indicado por la norma NOM-247-SSA1-2008. La diferencia en el contenido de humedad encontrado en este trabajo comparado con diversos autores, podría atribuirse al método y/o condiciones de secado empleados, en este caso se empleó el método de lecho fluidizado, mientras los autores utilizaron el método de secado en charolas.

Tabla 8. Composición química de harinas de *Moringa*

Muestra	Contenido (g/100 g.s.s)		
	Humedad	Lípidos	Cenizas
HHM1	1.6721 ± 0.11 ^b	10.0015 ± 1.20 ^a	9.7156 ± 0.11 ^b
HHM2	2.5681 ± 0.12 ^a	11.3566 ± 0.39 ^a	9.2830 ± 0.05 ^c
HHM3	2.7050 ± 0.16 ^a	7.5953 ± 0.55 ^b	12.7538 ± 0.02 ^a

Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en una misma columna indican diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) con la prueba de Tukey. HHM1: Harina de hojas de moringa lote 1 (mayor edad, cosechada en enero), HHM2: Harina de hojas de moringa lote 2 (menor edad, cosechada en enero), y HHM3: Harina de hojas de (mayor edad, cosechada en agosto).

El contenido de lípidos encontrado fue mayor (10.67, 11.00 y 7.59 g/100 g.s.s.) a lo reportado por Páramo-Calderón *et al.*, (2019), quienes reportaron un contenido de 6.48 g/100 g.s.s, de lípidos en harina de moringa. Diversas investigaciones han reportado concentraciones significativas de ácidos grasos en harina de hojas de *Moringa oleífera*, tal como es el ácido oleico, linoleico, α - linolénico (Velázquez-Zavala *et al.*, 2016 y Páramo-Calderón *et al.*, 2019) los cuales son ácidos grasos esenciales para el buen funcionamiento del organismo, ayudando a la eliminación del colesterol y evitando la acumulación del mismo, además, se ha reportado que regulan la presión arterial y promueven una correcta función cerebral. En ese sentido, el porcentaje elevado de lípidos en este tipo de harina puede ser atribuido a la presencia de ácidos grasos.

Por su parte, el contenido de cenizas fue de 9.71, 9.28 y 12.75 g/100 g.s.s. para las muestras de harina 1, 2 y 3 respectivamente, con diferencia significativa entre los tres lotes. La diferencia en los resultados de la composición química entre harinas con relación a lo reportado por diversos autores, puede atribuirse a la ubicación, el clima o ciertos factores ambientales que influyen significativamente en el contenido de nutrientes del árbol (Moyo *et al.*, 2011).

De acuerdo con Barminas *et al.*, 1998, las hojas de moringa poseen mayor contenido de Ca (4000 mg) que la leche (300 – 400 mg), y más Fe (289 mg) que la carne de res (2 mg), cubriendo la cantidad requerida en la dieta diaria (25 – 31 mg, OMS., 1975), que son los minerales de mayor importancia para el organismo humano, ayudando al crecimiento, prevención de anemia, así como también favorece la síntesis de ADN y ARN; por lo consiguiente, la harina de *Moringa oleífera* obtenida representa ser una fuente rica en minerales.

7.1.1.2 Contenido de fenoles totales (CFT) y actividad antirradical (AAr) por ensayo DPPH

En la Tabla 9 se muestran los resultados del CFT y AAr de los diferentes lotes de harinas. Se observó que el lote HHM1, correspondiente al árbol de mayor edad, mostró un CFT más elevado (4.81 g EAG/100 g.s.s.) con respecto a HHM2 (3.95 g EAG/100 g.s.s.) y HHM3 (2.15 gEAG /100 g.s.s.). Vázquez-León *et al.*, (2017) encontró que la edad del árbol es un factor que se relaciona con el CFT, encontrando mayor contenido de compuestos

fenólicos en árboles de mayor edad, como respuesta a manera de protección, por una mayor exposición al estrés ambiental.

De acuerdo a la determinación de actividad antirradical por DPPH, la harina con mayor actividad antirradical fue HHM2 (2.70 %), seguida de HHM1 (2.64 %) sin diferencias significativas entre ambas, pero sí con respecto al tercer lote HHM3 (2.27 %). El aumento de la radiación solar, la temperatura media, la radiación UV y la precipitación, son factores climáticos que genera en las plantas la expresión de metabolitos secundarios para contrarrestar la acumulación de especies reactivas de oxígeno sintetizadas por el estrés climático (Bartwal *et al.*, 2013). Debido a ello, el bajo porcentaje encontrado en HHM3 puede atribuirse a una baja en los factores climáticos en el mes de agosto.

Tabla 9. Contenido de fenoles totales y actividad antirradical de harinas de moringa

Muestra	CFT (g EAG / 100 g.s.s.)	AAr por DPPH (g E.T/ 100 g.s.s.)
HHM1	4.81 ± 0.043 ^a	2.64 ± 0.047 ^b
HHM2	3.95 ± 0.024 ^a	2.70 ± 0.026 ^a
HHM3	2.15 ± 0.001 ^b	2.27 ± 0.217 ^c

Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en una misma columna indican diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) con la prueba de Tukey. HHM1: Harina de hojas de moringa lote 1 (mayor edad, cosechada en enero), HHM2: Harina de hojas de moringa lote 2 (menor edad, cosechada en enero), y HHM3: Harina de hojas de (mayor edad, cosechada en agosto).

7.1.2 Harina de plátano

Se procesaron 13.88 kg de pulpa de plátano, de los cuales se obtuvieron 5.5 kg de harina, logrando un rendimiento del 39.6 % en el procesamiento de la harina de plátano verde.

7.1.2.1 Análisis químico proximal

Los resultados de la composición química proximal de la harina de plátano verde se muestran en la Tabla 10. El contenido de humedad fue de 3.32 g / 100 g.s.s., el cual fue

menor a lo reportado por otros autores (Aguirre-Cruz *et al.*, 2008; Ovando-Martínez *et al.*, 2009; Utrilla-Coello, 2012) que oscilan desde 5.47 a 12.6 g / 100 g.s.s.

Cabe destacar que el contenido de humedad es un parámetro importante en la vida útil de los alimentos, ya que la presencia de agua libre promueve el desarrollo microbiológico de los alimentos. En este sentido, tomando como referencia la NOM-247-SSA1-2008 la cual establece que el valor máximo permisible para harinas es del 15 %, porcentaje reportado en el presente trabajo se encuentra dentro de la especificación.

El contenido de lípidos fue de 0.71 g/100 g.s.s. y de acuerdo con Proterra, (2002) el plátano en estado inmaduro posee mayor contenido de almidón y un menor promedio del resto de macromoléculas (1 %) como lípidos, proteína y fibra. Por otra parte, el contenido de cenizas fue de 2.02 g/ 100 g.s.s., lo cual es atribuido a que el plátano se caracteriza por ser una fuente rica de minerales como el potasio, magnesio y calcio (Moreiras *et al.*, 2013; Pacheco de Delahaye., 2001). Sin embargo es importante resaltar que muchas veces el contenido de cenizas varía en función al tipo de suelo del cultivo, a la obtención de la harina a partir de la pulpa únicamente o la utilización del fruto entero.

Tabla 10. Composición química de harina y pulpa de plátano

Muestra	Contenido (g / 100 g.s.s)		
	Humedad	Lípidos	Cenizas
PPV	56.4988 ± 0.20	ND	ND
HPV	3.3210 ± 0.15	0.7175 ± 0.04	2.0263 ± 0.13

Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. PPV: Pulpa de plátano verde, HPV: Harina de plátano verde. ND: No determinado.

7.1.2.2 Caracterización por difracción de rayos X (DRX)

El análisis por DRX de la harina de plátano verde, mostró picos de difracción de mayor intensidad en 2θ a 15° , 17° , y 23° (Figura 5), característicos de un patrón tipo A. El patrón de difracción de rayos X tipo A hace referencia al tipo de cristal que se forma debido al empaquetamiento de las dobles hélices de las cadenas de amilopectina, el cual es relativamente compacto y con un bajo contenido de agua, suelen presentar longitudes cortas de las cadenas de amilopectina y un alto grado de ramificación (Zobel, 1988). Se

han reportado por otros autores un patrón tipo B (; Lucas, 2013) y tipo C (De la Rosa Millán., 2014) para harina de plátano. Las variaciones en los patrones de difracción es debido a las diferencias estructurales encontradas en la amilopectina, como longitud, distribución y empaquetamiento de las cadenas, y el grado de ramificación (Sang-Ho y Jay Lin, 2002). Por su parte, el mismo tipo de patrón coincide con lo reportado para el almidón nativo descrito más adelante, lo cual se relaciona porque el fruto fue adquirido con el mismo proveedor y el almidón es el principal componente de la harina.

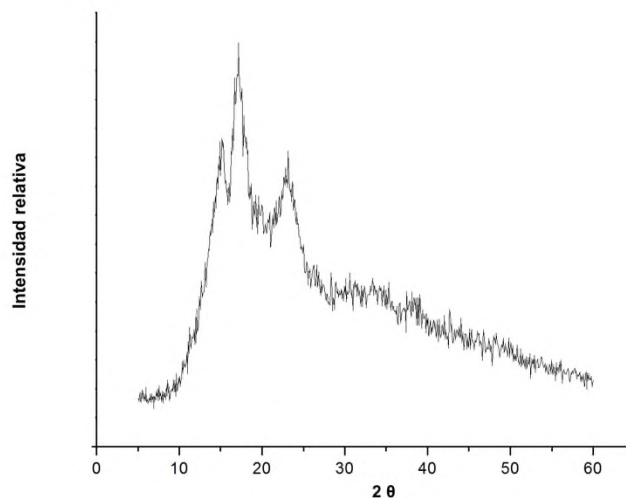


Figura 5. Patrón de difracción de rayos X de harina de plátano

7.1.2.3 Perfil de pasting

La búsqueda de nuevas fuentes de harina como ingredientes de interés en el desarrollo de productos alimenticios, requieren el cumplimiento de ciertas propiedades funcionales como la viscosidad, que permitan la sustitución parcial de la harina de trigo, ésta última caracterizada por su visco elasticidad atribuida por el gluten. En este contexto, el perfil de pasting permite conocer el comportamiento reológico de la harina de plátano, como parte de su funcionalidad.

En la Figura 6 se muestran los resultados de la harina de plátano, observando una viscosidad máxima a 4.2 Pa.s a una temperatura de 95 °C después de 4.6, en este punto el almidón alcanza el mayor porcentaje de gránulos hinchados intactos y los puentes de

hidrógeno entre las cadenas de almidón se disocian. Durante la fase de calentamiento constante (90 °C) ocurre la ruptura del gránulo, y se reduce su viscosidad a 2.2 Pa.s porque las moléculas de amilosa comienzan a lixiviarse. Durante la etapa de enfriamiento (63 °C) la amilosa y amilopectina solubilizadas empiezan a reasociarse, incrementando la viscosidad final a 4.7 Pa.s.

Los resultados obtenidos (viscosidad) sugieren que la harina de plátano puede ser una alternativa apta como sustituto parcial de la harina de trigo sin afectar las características reológicas de la masa.

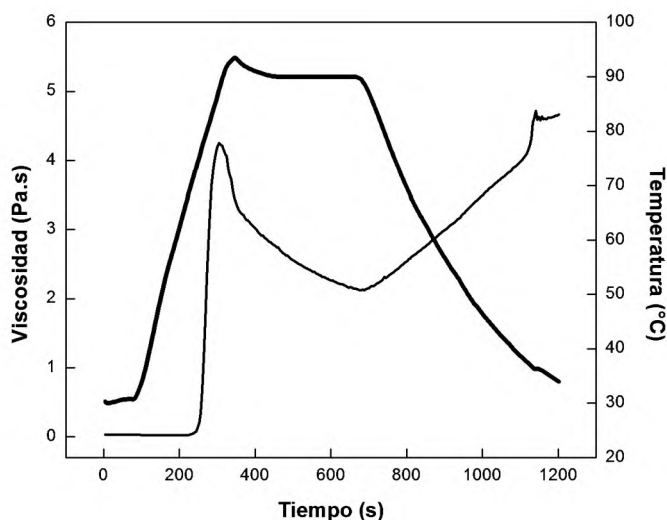


Figura 6. Perfil de pasting de harina de plátano

7.1.3 Almidón modificado

7.1.3.1 Análisis químico proximal

Los resultados de la composición química del almidón nativo se muestran en la Tabla 11. El contenido de humedad encontrado fue de 2.76 g/100 g.s.s., 1.16 g/100 g.s.s. para lípidos y 0.07 g/100 g.s.s. para cenizas.

Zamudio-Flores., 2005 reportó valores de 8.3 % de humedad, 1.85 % de lípidos y 1.89 % de cenizas. Por su parte, Utrilla-Coello *et al.*, 2014 reportó un contenido de humedad

de 7.7, 0.98 g/100 g.s.s. para lípidos y 0.82 g/100 g.s.s. para cenizas en almidones de plátano nativo.

En esta investigación el contenido de humedad encontrado fue menor, lo cual puede atribuirse a las condiciones de secado empleadas, y siendo estos resultados favorables puesto que el contenido de humedad juega un papel importante en el almacenamiento de los almidones.

Por otro lado, la presencia de lípidos y cenizas también fue menor, y de acuerdo a Proterra (2002) el plátano inmaduro se encuentra constituido principalmente de almidón (72%), y las grasas, proteínas, fibra y cenizas se encuentran en menor proporción (1 %).

Tabla 11. Composición química de almidón nativo de plátano

Muestra	Contenido (g/100 g.s.s)		
	Humedad	Lípidos	Cenizas
ANP	2.76 ± 0.06	1.16 ± 0.86	0.07 ± 0.05

Los valores corresponden al promedio ± desviación estándar, n=3. ANP: Almidón nativo de plátano.

7.1.3.2 Caracterización por FTIR

En la Figura 7 se observa el espectro por infrarrojo para almidón nativo y almidón modificado por entrecruzamiento. La señal observada a 2928 cm^{-1} corresponde al enlace de hidrógeno de los grupos hidroxilo asociados con el enlace inter e intra molecular del grupo hidroxilo, característicos de la estructura del almidón (Zamudio-Flores *et al.*, 2010). Para este estudio, se determinó el área bajo la curva de la banda de absorción para ambos almidones, observando una pérdida de intensidad de señal de 52.52 % del AME con respecto al ANP.

Por su parte, almidón modificado no mostró picos de absorción característicos a $P = O$ y $P - O - C$ (Suflet *et al.*, 2006). De tal manera que se realizó la segunda derivada del espectrograma para identificar los picos que determinen la modificación química del almidón con ayuda del software Origin 7.0, mostrado en la Figura 8. De acuerdo a Smits *et al.*, 1998, los picos alrededor de 1047 cm^{-1} son característicos de la región más organizada del almidón, y alrededor de 1022 cm^{-1} corresponde a la región amorfa. En este sentido, la

intensidad de la banda observada en el almidón nativo a una señal de 1050 cm^{-1} correspondiente entonces a la región organizada, disminuyó después del entrecruzamiento. Este comportamiento puede atribuirse a una pérdida de la cristalinidad, lo cual puede ser corroborado con los análisis térmicos y de difracción de rayos X, estos resultados se relacionan a su vez con el perfil de Pasting, al ser la amilopectina la que contribuye al hinchamiento del gránulo del almidón.

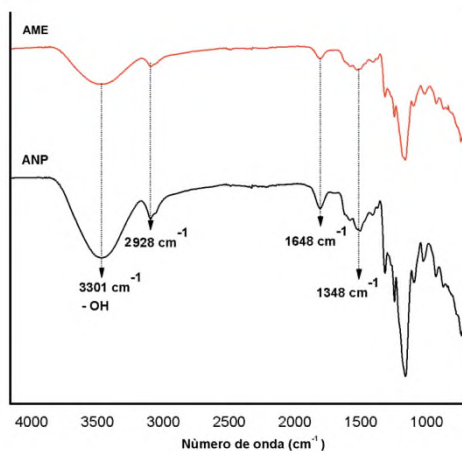


Figura 7. Espectrograma de infrarrojo de almidón nativo (ANP) y almidón entrecruzado (AME) de plátano.

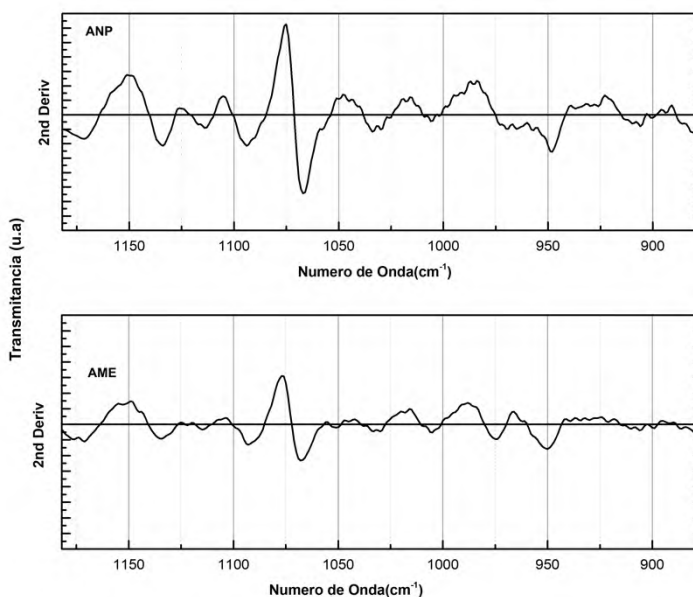


Figura 8. Segunda derivada del espectro infrarrojo de almidones de plátano.

7.1.3.3 Caracterización por DRX

En la Figura 9 se observan los patrones de difracción del almidón nativo y almidón modificado de plátano. El almidón nativo mostró picos de difracción de mayor intensidad en 2θ de 15° , 17° y 23° , correspondientes a un patrón tipo A. De acuerdo a Tester & Karkalas (2004), el polimorfismo de tipo A tiene picos de mayor intensidad para los ángulos 2θ a 15° , 17° y 23° , y se caracteriza por ser relativamente compacta con un bajo contenido de agua (4-6 moléculas de agua por hélice), típico de almidones de cereales. Aparicio-Saguilán (2008), reportó un patrón tipo A para almidón de plátano, sin embargo, diversos estudios han reportado patrones tipo B y C (De la Rosa Millán., 2014; Espinosa-Solis, 2008). Las variaciones en los patrones de difracción en comparación con otros autores se deben a la variedad y condiciones de cultivo del fruto, así como a la estructura de la amilopeptina (Sang- Ho & Jay Lin, 2002).

Por su parte, el almidón modificado por entrecruzamiento (AME) no mostró los picos característicos del almidón nativo (patrón tipo A), lo cual sugiere que las condiciones de reacción del entrecruzamiento provocaron una gelatinización del almidón, afectando la región cristalina (Aparicio-Saguilán et al., 2008), de tal manera que no se puede apreciar algún pico de difracción, este comportamiento se relaciona con los resultados por FTIR donde se mostró una disminución en el pico a un número de onda de 1050 cm^{-1} correspondiente a la región organizada del gránulo del almidón.

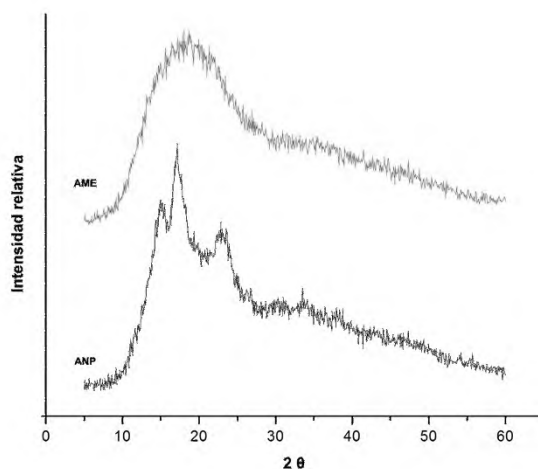


Figura 9. Patrones de difracción de rayos X de almidón nativo (ANP) y entrecruzado de plátano (AME)

7.1.3.4 Perfil de pasting

Los resultados del análisis de perfil de viscosidad del almidón nativo de plátano y almidón entrecruzado (AME) se muestra en la Figura 10. El almidón nativo mostró una viscosidad máxima a 3.4 Pa.s a una temperatura de 95 °C después de 4.6 min, indicativo de que los gránulos de almidón lograron su la ruptura del gránulo (90 °C) la viscosidad se redujo a 2.7 Pa.s. Durante la etapa de enfriamiento (a 42 °C) ocurre la reorganización de las cadenas (principalmente amilosa) lixiviadas, originando una red que retiene una gran cantidad de moléculas de agua, por lo que la viscosidad final presentó un aumento a 6.4 Pa.s. La viscosidad final se asocia con el contenido amilosa, debido a ello, el aumento en la viscosidad final sugiere que el almidón nativo posee alto contenido en amilosa.

Por otra parte, la prueba en el almidón entrecruzado (AME) no registró valores de viscosidad. Esto podría ser debido a que durante la modificación química hay un rompimiento de la estructura granular del almidón (Aparicio-Saguilán, 2008). La amilopectina es la principal responsable del hinchamiento y viscosidad de la pasta del almidón (Tester & Morrison, 1990). En este contexto, la pérdida de viscosidad observada se correlaciona con los datos obtenidos por el análisis en DRX, donde se observó un material amorfo, atribuido a la pérdida del orden molecular del gránulo del almidón después de ser sometido a la modificación.

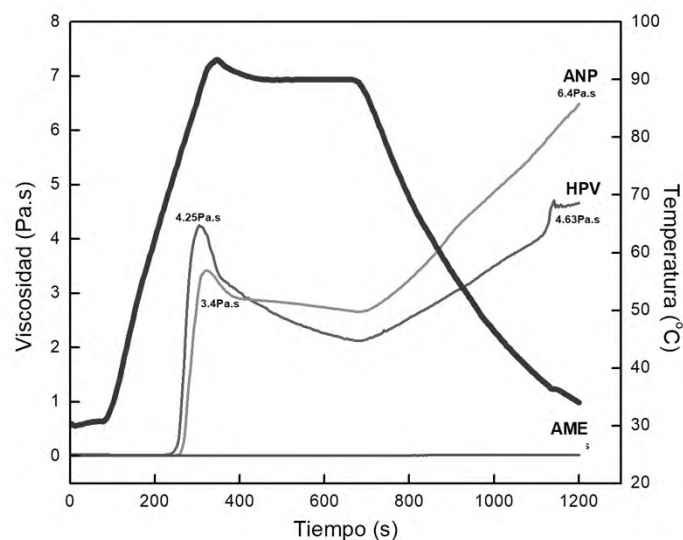


Figura 10. Perfil de viscosidad de almidón nativo (ANP), almidón entrecruzado (AME) y harina de plátano (HPV)

7.1.3.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El análisis por DSC se utiliza para conocer los parámetros térmicos de temperatura de inicio de gelatinización (Ti), temperatura de pico (Tp), temperatura final (Tf) y el cambio de entalpía asociado a la gelatinización (AH). Los resultados para este estudio se muestran en la Tabla 12 y en la Figura 11 de manera gráfica.

El almidón nativo de plátano presentó una temperatura de gelatinización de 76.75 °C y una entalpía de 8.03 J/g. Espinosa-Solis (2008), reportó un valor de Tp 76.5 °C para almidón de plátano; Millán-Testa (2004) reportó un valor de similar de Tp (76.4 °C), sin embargo, con valores de entalpía mayores. Yuan *et al.*, (1993) menciona que almidones con moléculas de amilopectina de cadenas cortas tienen temperaturas de gelatinización menores, lo cual se relaciona con el tipo de patrón encontrado en el almidón (tipo A). Mientras que un bajo valor de entalpía hace referencia a menor cristalinidad.

Tabla 12. Temperaturas de gelatinización del almidón nativo de plátano y almidón entrecruzado

Muestra	Ti °C	Tp °C	Tf °C	ΔH (J/g)
ANP	73.735 ± 0.07	76.755± 0.12	83.525 ± 0.70	8.031 ± 0.87
AME	ND	ND	ND	ND

Los valores corresponden al promedio ± desviación estándar, n=2. ANP: Almidón nativo de plátano; AME: Almidón entrecruzado; ND: No detectable. Ti= Temperatura de inicio; Tp= Temperatura de pico; Tf= Temperatura final; ΔH= Entalpía de gelatinización.

El almidón modificado no mostró valores detectables de gelatinización, lo que puede corroborar la hipótesis planteada de acuerdo a los análisis descritos anteriormente (DRX, viscosidad), atribuyendo dichos comportamientos a una desorganización estructural del almidón debido a la modificación química. La pérdida de gelatinización refleja la influencia de la modificación, la cual debilita la estructura interna del gránulo y a su vez, las cadenas del almidón son covalentemente unidas a una u otra cadena por grupos fosfatos.

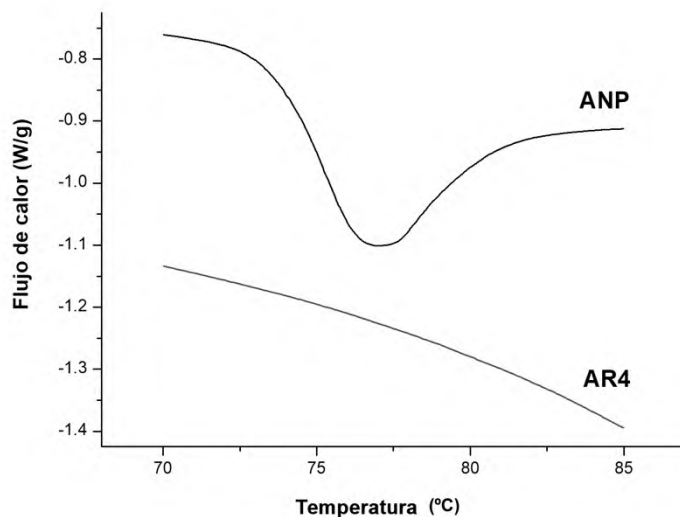


Figura 11. Termograma de almidón nativo y almidón entrecruzado de plátano

Chavan *et al.*, (1999); Adebowale *et al.*, (2006) han descrito que la gelatinización involucra el desdoblamiento y fusión de las cadenas externas de la amilopectina que se encuentran empaçadas junto con las dobles hélices en racimos, mientras que la entalpía es debido principalmente al desdoblamiento de las dobles hélices más que a la destrucción de la cristalinidad. De esta manera, si los valores de gelatinización no fueron detectables, es porque no se logra llevar a cabo dicho fenómeno, indicando que ya no hay una estructura que desdoblar.

Tabla 13. Condiciones de entrecruzamiento

Condiciones anteriores	Nuevas condiciones
11 g de Trimetafosfato de sodio	0.596 Trimetafosfato de sodio
5.6 g de Tripolifosfato de sodio	60 mg de Tripolifosfato de sodio
10 g de Sulfato de sodio	0.5 g de Sulfato de sodio

En conjunto, los resultados obtenidos de la caracterización estructural del almidón modificado confirmó el entrecruzamiento, y sugieren la pérdida de la estructura granular del almidón debido a una inestabilidad en las condiciones usadas durante la modificación

química, atribuidas al uso excesivo de agentes entrecruzantes. En este sentido, se sugirieron nuevas cantidades de agentes (Tabla 13) manteniendo un pH de 11.5, temperatura de 45 °C durante 3 h durante la modificación química.

El almidón modificado con las nuevas condiciones de reacción, fue caracterizado. Por consiguiente, una vez realizado el nuevo entrecruzamiento del almidón con las modificaciones antes mencionadas, se realizó la respectiva caracterización que se describe a continuación con las nuevas condiciones.

7.1.4 Almidón modificado con nuevas condiciones

7.1.4.1 Caracterización por DRX

El difractograma de rayos X de los almidones de plátano nativo y modificado se muestran en la Figura 12. La cristalinidad del almidón está asociada con el contenido de amilopectina, y la fase amorfa con el contenido de amilosa. El almidón entrecruzado (**AME**) mostró picos de difracción de mayor intensidad a un ángulo 2θ a 15° , 17° y 23° , correspondientes a un patrón tipo A. Lo anterior indica que el entrecruzamiento en esta ocasión no afectó el patrón de difracción, y de acuerdo a Zhang *et al.*, (2012), cuando no se observan cambios estructurales, esto puede deberse a que la reacción ocurre principalmente en las regiones amorfas.

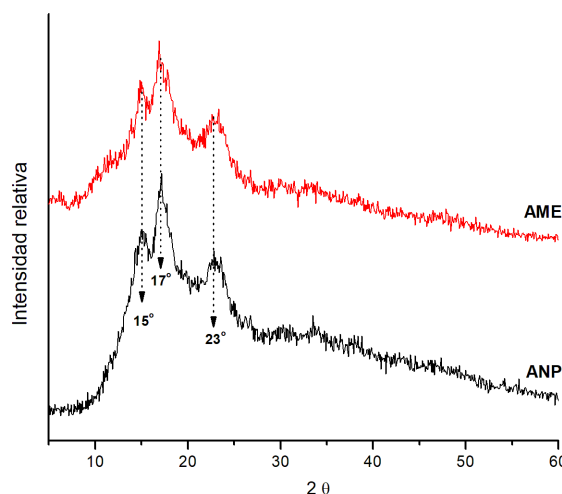


Figura 12. Patrones de difracción de rayos X de almidón nativo (ANP) y almidón entrecruzado (AME) de plátano

7.1.4.2 Caracterización por FTIR

Como se muestra en la Fig. 13, la presencia de grupos -OH se confirma por la vibración de estiramiento a una señal de 3308 cm^{-1} , 2928 cm^{-1} y 1398 cm^{-1} para ambos almidones, observando una reducción en la intensidad de señal después de la modificación (AME). Después de la modificación química, se encontraron dos nuevos picos a un número de onda de 1255 y 998 cm^{-1} , correspondientes a la presencia de grupos P=O. De modo que, la reducción de la banda de estiramiento de -OH en conjunto con la aparición de grupos P=O confirma que se ha llevado a cabo el entrecruzamiento del almidón con STMP/STPP.

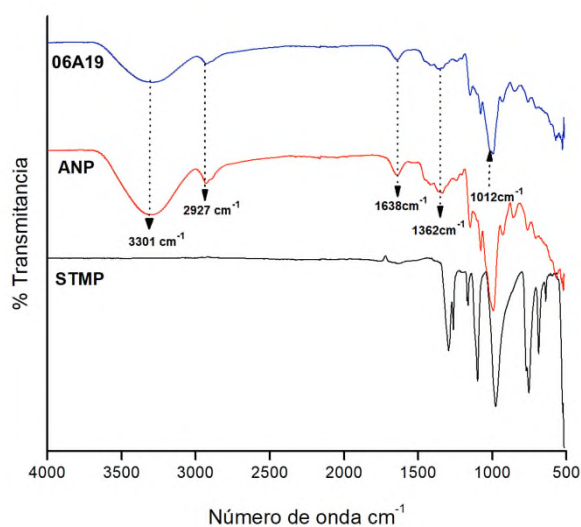


Figura 13. Espectrograma de infrarrojo de almidón nativo (ANP) y almidón entrecruzado (AME) de plátano

7.1.4.3 Perfil de pasting

Los resultados del perfil de pasting del almidón nativo y entrecruzado (**AME**) se muestran en la Figura 14. La modificación química afectó la propiedad de formación de pasta en **AME**, mostrando una viscosidad pico de $0.014\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$), durante el rompimiento del gránulo la viscosidad aumentó a $0.016\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$), y durante la etapa de enfriamiento, llegó a una viscosidad final de $0.02\text{ Pa}\cdot\text{s}$. La pérdida de viscosidad se relaciona con la formación de nuevos enlaces reforzados después del entrecruzamiento, de manera que al tener un almidón con más interacciones entre sus cadenas

(entrecruzamiento) se refuerza la estructura y disminuye la cantidad de grupos –OH disponibles para interactuar con otra molécula (como se muestra en los resultados de FTIR), y así mismo se reduce su capacidad de absorción de agua e hinchamiento del gránulo.

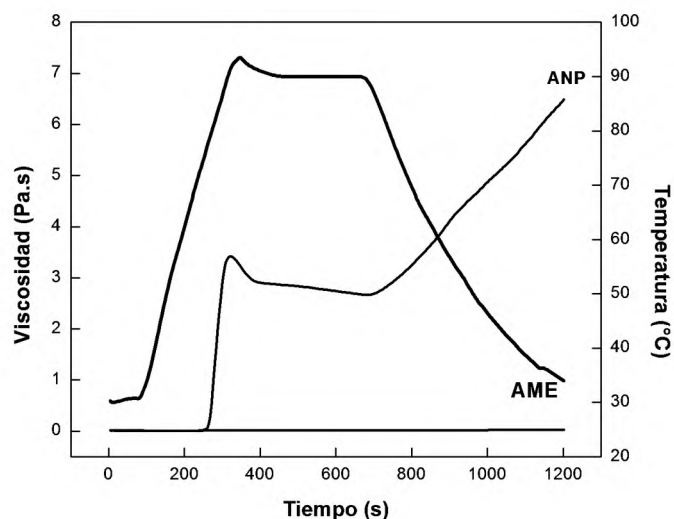


Figura 14. Perfil de Pasting de almidón nativo (ANP) y almidón entrecruzado (AME).

7.1.4.4 Caracterización por DSC

Después del entrecruzamiento, la temperatura de gelatinización aumentó de 76.82 °C a 88.25 °C en comparación al almidón nativo (Tabla 14). Este comportamiento fue reportado por Aparicio-Saguilán *et al.*, (2005), donde se menciona que este hecho es el reflejo de la unión covalente de las cadenas de almidón, que provoca mayor requerimiento de temperatura para llevar a cabo este fenómeno debido a su modificación, aumentando de esta manera su estabilidad térmica.

Por otra parte, la entalpía de gelatinización disminuyó significativamente (de 7.88 J/g a 1.34 J/g) después del entrecruzamiento (Tabla 14). Este comportamiento es debido a que la modificación química se llevo a cabo en las zonas cristalinas provocando un rearrreglo de las cadenas cortas de este biopolímero, lo cual genera estructuras cristalinas menos perfectas que requieren menos energía para ser desdobladas (Rivas-González *et al.*, 2008). Aparicio-Saguilán *et al.*, (2008) reportaron un comportamiento similar, sin embargo, ellos

atribuyen la disminución de la entalpía a que las condiciones de reacción afectaron las zonas cristalinas.

Tabla 14. Temperaturas de gelatinización del almidón nativo de plátano y almidón entrecruzado

Muestra	Ti °C	Tp °C	Tf °C	ΔH (J/g)
ANP	73.77 ± 0.07 ^b	76.82 ± 0.12 ^b	83.91 ± 0.70 ^b	7.88 ± 0.87 ^a
AME	79.61 ± 0.37 ^a	88.25 ± 0.11 ^a	97.39 ± 0.79 ^a	1.34 ± 0.05 ^b

Valores promedio de tres repeticiones ± error estándar. Valores con la misma letra dentro de la misma columna no son significativamente diferentes a $p < 0.05$. T_o = Temperatura inicial, T_p = Temperatura de pico, T_f = Temperatura final, ΔH = Entalpía de gelatinización. ANP: Almidón nativo de plátano; AR4: Almidón entrecruzado.

7.1.4.5 Determinación del contenido de AR

Al analizar el contenido de almidón resistente (AR) se encontró un promedio de 46.99 g / 100 g.s.s. Diversos autores han reportado un contenido de AR de 26.06, 37.05 y 67.6 g/100 g.s.s. de forma nativa en almidón de plátano, el cuál dependerá del tipo de cultivo, tiempo de cosecha, desarrollo del fruto (Utrilla-Coello *et al.*, 2014; Páramo-Calderón *et al.*, 2016; Reyes-Atrizco *et al.*, 2019). Sin embargo, se ha corroborado que la fracción resistente en almidones nativos, es susceptible a la hidrólisis enzimática después de someterse a procesos que involucren presión o temperatura, debido a que el calentamiento del almidón en agua causa ruptura de los puentes de hidrógeno entre las cadenas del polímero debilitando al gránulo (Utrilla-Coello *et al.*, 2014; Aparicio-Saguilán *et al.*, 2005; Thomas & Atwell, 1999). Por su parte, la formación de nuevos enlaces cruzados unidos covalentemente actúan como "soldaduras por puntos" que refuerzan la estructura granular del almidón. De acuerdo con lo anterior, **AME** sugiere ser un almidón que resiste a la hidrólisis por enzimas digestivas, aún después de ser sometido a procesamiento durante el desarrollo de un producto alimenticio, por lo que puede emplearse como un ingrediente funcional y conservar sus beneficios.

Tabla 15. Contenido de almidón resistente del AME

Muestra	Contenido de AME(g/100 g.s.s.)
Almidón entrecruzado	46.99 ± 2.53

Valores expresados corresponden a la media de tres repeticiones ± desviación estándar. AR: Almidón resistente.

En base a los resultados obtenidos anteriormente, en conjunto se confirma que las nuevas condiciones de entrecruzamiento permitieron la producción de almidón resistente mediante la modificación de manera adecuada.

Con la finalidad de obtener suficiente cantidad de AR para su aplicación en el desarrollo de un alimento funcional, y una vez confirmado el proceso de producción de AR, se continuó al desarrollo del mismo en mayor cantidad, dividido en 5 lotes, denotándolos como “AME-1”, “AME-2”, “AME-3”, “AME-4” y “AME-5” (**AME - # = Almidón Modificado por Entrecruzamiento– # Lote**), comparando los resultados de su respectiva caracterización estructural el resto de los almidones.

7.1.5 Lotes de almidón entrecruzado

7.1.5.1.1 Caracterización por DRX

Con la finalidad de corroborar si la modificación de cada lote tuvo algún efecto diferente en la estructura del gránulo, se realizó su análisis por DRX. De manera general los diversos lotes mostraron picos de mayor intensidad a un ángulo 2θ a 15° , 17° y 23° , correspondientes a un patrón de difracción tipo A, similar al almidón nativo. A pesar de que se conserva el patrón de difracción, se logra observar diferencia en la intensidad de los picos en los diversos lotes. Eso se debe a que el entrecruzamiento, a pesar de ocurrir principalmente en las zonas amorfas, también puede ocurrir en regiones cristalinas de los gránulos del almidón Cai *et al.*, (2019). Por lo tanto, estos resultados sugieren que la modificación química afectó la cristalinidad sin modificar el tipo patrón de difracción del almidón en los diversos lotes de almidón modificados.

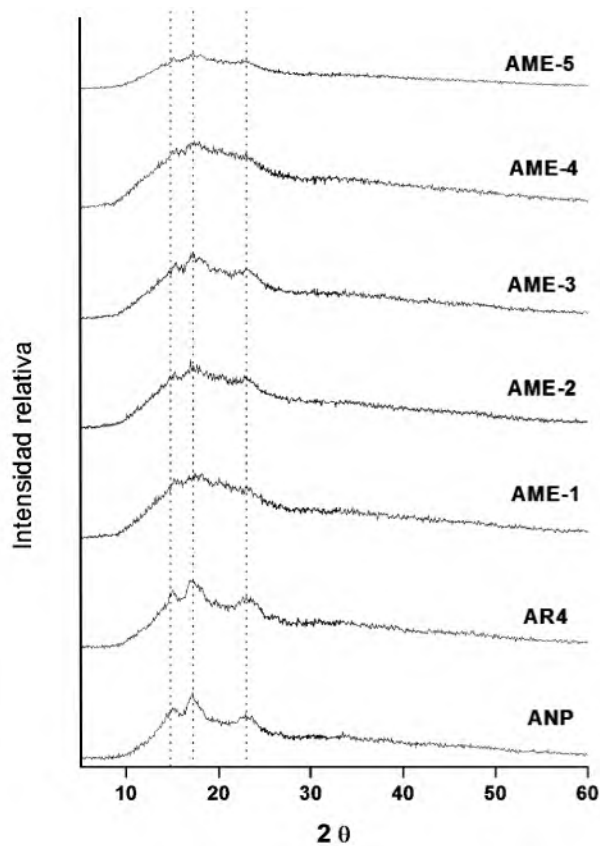


Figura 15. Patrones de difracción de almidón nativo (ANP), resistente (AR4) y lotes modificados (AM-#).

7.1.5.2 Perfil de pasting

Las propiedades funcionales y fisicoquímicas dependerán del orden y estructura del almidón (Bello-Pérez, 1996). En este contexto, se realizó un análisis rápido de viscosidad (perfil de pasting) para corroborar que la modificación química por entrecruzamiento haya sido reproducible en los diferentes lotes, y con ello obtener las mismas propiedades funcionales en el almidón. Los resultados de viscosidad de los almidones entrecruzados se muestran en la Figura 16. Los resultados revelaron que las modificaciones químicas redujeron la viscosidad del almidón modificado en comparación al nativo. Esto indica que el comportamiento obtenido de los 5 lotes entre sí, es similar a lo reportado para **AME**. Asimismo, para fundamentar la similitud entre los distintos lotes de almidones modificados, se realizó un análisis estadístico de la viscosidad pico para todos los almidones (Tabla 16). De acuerdo a los datos obtenidos descritos en la Tabla 16, no existe diferencia estadística

significativa en la viscosidad pico entre los distintos lotes de almidón modificado. De tal manera, que al encontrar la viscosidad pico sin diferencia significativa estadísticamente contra “AME”, se puede esperar que los nuevos lotes de almidón entrecruzado presenten almidón resistente térmicamente estable.

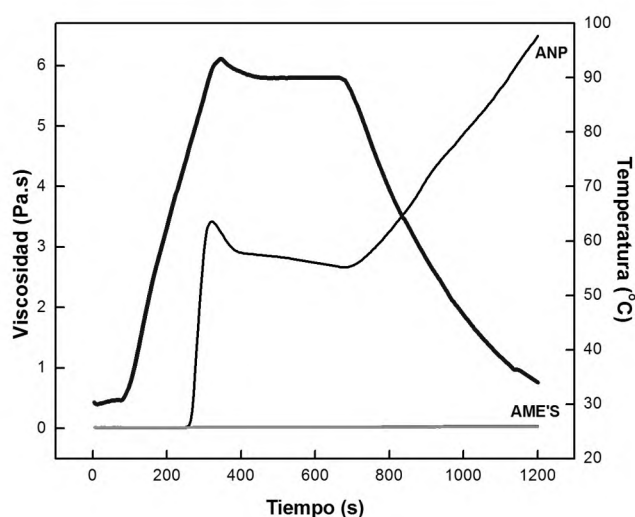


Figura 16. Perfil de Pasting de almidón nativo (ANP) y lotes de almidón entrecruzados (AME'S).

Tabla 16. Valores de viscosidad de los almidones modificados

Muestra	Viscosidad pico (Pa.s)
AME-4	0.024 ± 0.00009 ^b
AME-1	0.020 ± 0.00016 ^b
AME	0.014 ± 0.00014 ^b
AME-3	0.014 ± 0.00024 ^b
AME-5	0.015 ± 0.00046 ^b
AME-2	0.014 ± 0.00005 ^b

Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en una misma columna indican diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) con la prueba de Tukey.

7.2 Producto final

De acuerdo a la investigación aplicada y los resultados obtenidos en el proyecto, se logró obtener el desarrollo de los ingredientes funcionales con las propiedades visco elásticas adecuadas para lograr su incorporación en el desarrollo de todas las formulaciones de sopas instantáneas propuestas por el diseño experimental descrito anteriormente.

Las sopas instantáneas se elaboraron iniciando con una etapa de mezclado y amasado de ingredientes, con su respectivo reposo; seguido de una etapa de laminado y formación de fideos, para posteriormente ingresarlas a una etapa de cocción. Las pastas cocidas fueron deshidratadas (Figura 17) y almacenadas en bolsas metálicas para su posterior uso (Figura 18).



Figura 17. Proceso de elaboración de sopa instantánea

Hasta el momento se estaban realizando pruebas pre-liminares de textura para determinar las condiciones de la misma (Figura 19). Sin embargo, debido a la contingencia por SARS-CoV-2 (2020) no se culminaron los análisis programados correspondientes a la caracterización funcional del producto final.

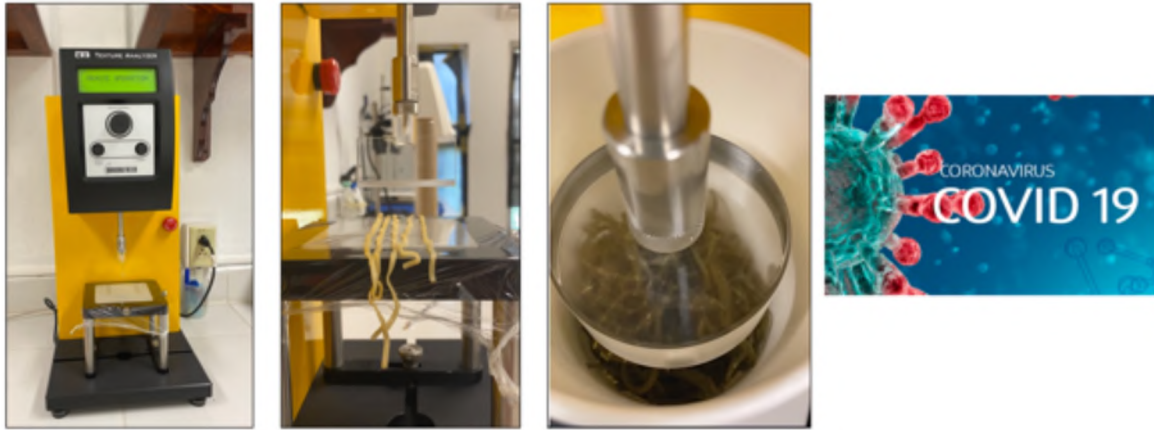


Figura 18. Prueba pre-liminar de textura

8 CONCLUSIONES

- La caracterización parcial de las harinas de *Moringa oleífera* presentaron alto contenido de fenoles totales (4.8 g - 3.95 g EAG/100 g.s.s.) y actividad antiradical (2.64 - 2.7 %). Por su contenido nutricional y funcional podría tener numerosas aplicaciones como ingrediente funcional.
- Las condiciones de entrecruzamiento propuestas, empleando la mezcla de STMP/STPP, permitieron el desarrollo de un alto contenido de AR (46.99 ± 2.53 g/100 g.s.s.) con mayor estabilidad térmica. La modificación química permite diversificar su aplicación, principalmente para su uso en el desarrollo de productos que requieran ser sometidos a procesos de cocción.
- De acuerdo a las características reológicas, la harina de plátano verde se logró utilizar como sustituto parcial de la sémola de trigo hasta un 50 %, en el desarrollo de la pasta.
- La caracterización de los ingredientes desarrollados sugieren ser alternativas de interés para su aplicación como ingredientes funcionales en el desarrollo de alimentos funcionales.
- Se logró el desarrollo de las formulaciones de sopas instantáneas incorporando los **ingredientes funcionales** desarrollados, lo que sugiere que el producto final podría representar una alternativa potencial como **alimento funcional** de alta demanda y con beneficios para el consumidor.

9 PERSPECTIVAS

Es importante determinar las propiedades nutricionales y funcionales de las sopas elaboradas después de la reconstitución, así como realizar un análisis estadístico para seleccionar la mejor formulación de sopa instantánea de acuerdo con su valor nutricional y funcional; y comparando sus beneficios con alguna sopa comercial de alto consumo para resaltar el aporte en el diseño de alimentos funcionales.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Ai Y, Hasjim J, Jane J. 2013. Effects of lipids on enzymatic hydrolysis and physical properties of starch. *Carbohydr Polymers*, 92. 120-127
- Adebowale, K.O.; Afolabi, T. A.; Lawal, O. S. 2002. Isolation, chemical modification and physicochemical characterisation of Bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*) starch and flour. *Food Chemistry*. 78: 305-311.
- Acevedo-Tello, Sergio. 2014. Elaboración de tortillas con propiedades nutraceuticas a partir de una mezcla de masa de maíz nixtamalizado con harina de moringa (*Moringa oleífera*): caracterización nutricional, color y textura. Tesis Licenciatura. TNM-Tecnológico de Acapulco
- Aguirre-Cruz. A., Bello-Pérez L.A, González -Soto R.A and Álvarez-Castillo. A. 2008. Modificación química del almidón presente en la harina de plátano macho (*Musa Paradisiaca L.*) y su efecto en el contenido de fibra dietética. X Congreso de ciencia de los alimentos y v foro de ciencia y tecnología de alimentos
- Alcázar-Alay, S.C., Almeida, M.A. 2015. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Science and Technology*, vol. 35 No. 2.
- Alsaffar AA. 2011. Effect of food processing on the resistant starch content of cereals and cereal products: a review. *International Journal Food Science and Technology* 46:455-62.
- Andy Wai Kan Yeung, Andrei Mocan & Atanas G. Atanosov. 2018. Let food be thy medicine and medicine be thy food: A bibliometric analysis of the most cited papers focusing on nutraceuticals and functional Foods. *Food Chemistry*. 269: 455 – 465.
- Aparicio-Saguilán, A. Gutiérrez-Meraz, G; García-Suárez, F.J; Tovar J; Bello-Pérez, L.A. 2008. Physicochemical and Functional Properties of Cross-linked Banana Resistant Starch. Effect of Pressure Cooking. *Starch/Stärke* 60: 286–291.
- Asante, W., Nasare, I., Tom-Dery, D., Ochire-Boadu, K., & Kentil, K. 2014. Composición nutricional de hojas de *Moringa oleifera* de dos zonas agroecológicas en Ghana.

African Journal of Plant Science , 8.

Ashwell M. Conceptos sobre Alimentos Funcionales. ILSI Europe Concise Monograph Series, ILSI Press 2005

Bartwal A, Mall R, Lohani P, Guru SK, Arora S. 2013. Role of secondary metabolites and brassinosteroids in plant defense against environmental stresses. *Journal Plant Growth Regul* 32(1):216–232.

Behall, K. M., Scholfield, D. J., & Canary, J. 1988. Effect of starch structure on glucose and insulin responses in adults. *American Journal of Clinical Nutrition*, 47, 428-432

Bello-Pérez, L. A. 1995. Amilopectina-Characterización molecular y funcional. Tesis Doctorado. Cinvestav-IPN. Irapuato, México.

Bello-Pérez, L.A., Paredes-López O., Roger P & Colonna P. 1996 Molecular characterization of some amylopectins. *Cereal Chemistry*, 73: 12-17.

Bello-Pérez, L.A., Agama-Acevedo, E., Sánchez- Hernández L. & Paredes-López O. 1999. Isolation and partial characterization of banana starches. *Journal Agricultural Food Chemistry* 47: 854-857.

Bello-Pérez, L. A., & Paredes-López, O. 1999. El almidón: lo comemos pero no lo conocemos. *Ciencia*. 50: 29-33.

Bello-Pérez LA, Agama-Acevedo E, Sáyago-Ayerdi S, Moreno-Damián E y Figueroa JDC. 2000. Some structural, physicochemical and functional studies of banana starches isolated from two varieties growing in Guerrero, México. *Starch/Stärke* . 52 (2-3): 68-73

Bello-Pérez, L. A., Romero-Manilla, R., & Paredes-López, O. 2000. Preparation and properties of physically modified banana starch prepared by alcoholic-alkaline treatment. *Starch/Stärke*, 52, 154–159.

Bernal L y Martínez BE. 2006. Una nueva visión de la degradación del almidón. *Revista del centro de investigación Universidad La Salle* . 7 (25): 77-90

Biliaderis CG. 1991. Th estructura and interactions of starch with food constituents.

- Bird, A. R., Brown, I. L., & Topping, D. L. 2000. Starches, resistant starches, the gut microflora and human health. *Current Issues in Intestinal Microbiology*, 1(1), 25–37.
- Bindels LB, Munoz RRS, Gomesneto JC, Mutemberezi V, Martínez I, Salazar N, Cody EA, Quintero-Villegas MI, Kittana H, ReyesGavilán CGDL, Schmaltz RJ, Muccioli GG, Walter J, RamerTait AE. 2017. Resistant starch can improve insulin sensitivity independently of the gut microbiota. *Microbiome* 5:12.
- Binsack, R., Boersma BJ., Patel RP., Kirk M., White CR., Darley-Usmar V., Barnes S., Zhou F. & Parks DA. 2001. Enhanced antioxidant activity after chlorination of quercetin by hypochlorous acid. *Alcohol Clinical and Experimental Research*; 25: 434-443.
- Brouns, F., Kettlitz, B., & Arrigoni, E. 2002. Resistant starch and butyrate revolution. *Trends in Food Science & Technology*, 13, 251–261.
- Bundy, J.D., Li, C., Stuchlik, P., Bu, X., Kelly, T.N., Mills, K.T., He, H., Chen, J., Whelton, P.K., He, J., 2017. Systolic blood pressure reduction and risk of cardiovascular disease and mortality: a systematic review and network meta-analysis. *JAMA Cardiology* 2, 775–781
- Cai, C., Wei, B., Tian, Y., Ma, R., Chen, L., Qiu, L., & Jin, Z. (2019). Structural changes of chemically modified rice starch by one-step reactive extrusion. *Food Chemistry*, 288, 354–360. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.03.01
- Casarrubias Castillo, Maria G. 2010. Digestibilidad y características moleculares de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y mango (*Mangifera indica* L.) modificados enzimáticamente. Tesis Maestría. *Centro de Desarrollo de Productos Bióticos*. Yautepec, Morelos.
- Chavan, U. D.; Shahidi, F.; Hoover, R & Perera, C. 1999. Characterization of beach pea (*Lathyrus maritimus* L.) starch. *Food Chemistry*. 65: 61-70.
- Chumark, P., Khunawat, P., Sanvarinda, Y., Phornchirasilp, S., Morales, N.P., Phivthong-Ngam, L., Ratanachamnong, P., Srisawat, S., Pongrapeeporn, K.U., 2008. The in vitro and ex vivo antioxidant properties, hypolipidaemic and antiatherosclerotic activities of water extract of *Moringa oleifera* Lam. Leaves. *Journal of Ethnopharmacology* 116,

439–446.

Clydesdale FM. 1997. A proposal for the establishment of scientific criteria for health claims for functional foods. *Nutrition Reviews*. 55:413–22.

Cotelle N, Bernier JL, Catteau JP, Pommery J, Wallet JC & Gaydou EM. 1996. Antioxidant properties of hydroxy-flavones. *Free Radical Biology and Medicine*; 20: 35-43.

Curá, J. A., Jansson, P.-E., and Krisman, C. R. 1995. Amylose is not strictly linear. *Starch/Staerke* 47: 207-209.

DanMalam, H., Abubakar, Z., Katsayal, U. 2001. Pharmacognosistic studies on the leaves of *Moringa Oleifera* Nig J. Nat. Prod. Med., 5 pp. 45-49.

De Baere H. 1999. Starch policy in the European community. *Starch/Starke*. 51: 189-193.

De Delahaye, Pacheco 2001. Evaluacion nutricional de sopas deshidratadas a base de harina de platano verde. Digestibilidad in vitro del almidon. *Tecnología de alimentos*. 52: 278-282.

Delville J, Joly C, Dole P y Bliard C. 2002. Solid state photocrosslinked starch bases films: a new of family of homogeneous modified starches. *Carbohydr Polymers* . 49: 71-81

Drewnowski, A. & Popkin, B. M. 1997. The nutrition transition: new trends in the global diet. *Nutrition Reviews*, 55:31-43.

Dronamraju, S. S., Coxhead, J. M., Kelly, S. B., & Mathers, J. C. 2007. Role of resistant starch in colorectal cancer prevention: A prospective randomised controlled trial. *American Journal of Gastroenterology*, 102(S2), 556–557

Dupuis, J. H., Liu, Q. & Yada, R. Y. 2014. Methodologies for Increasing the Resistant Starch Content of Food Starches: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Vol. 13.

Emilien CH, Hsu WH, Hollis JH. 2017. Effect of resistant wheat starch on subjective appetite and food intake in healthy adults. *Nutrition Reviews* 43:69–74

Englyst HN, C. J. 1990. Non-starch polysaccharides (dietary fibre) and resistant starch.

Advances in Experimental Medicine and Biology, 270.

Englyst, H., Kingman, S. M., & Cummings, J. H. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46 (2).

El poder del consumidor. 2008. El poder del consumidor. Obtenido de <https://elpoderdelconsumidor.org/2008/09/20-anos-de-sopas-instantaneas>

FAO/WHO. 2003. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: report of a joint WHO/FAO expert consultation. *Organización Mundial de la Salud, Geneva; World Health Organization technical report series*, 916.

Ferro-Luzzi, A. & Martino, L 1996. Obesity and physical activity. *Ciba Foundation Symposium*, 201:207--221.

Flores-Gorosquera, E., F. J. García-Suárez, E. Flores-Huicochea, M. C. Núñez-Santiago, R. A. González-Soto, y L. A. Bello- Pérez. 2004. Rendimiento del proceso de extracción de almidón a partir de frutos de plátano (*Musa paradisiaca*). Estudio en planta piloto. *Acta Científica Venezolana* 55(1):86-90.

Freiberger, C. E., Vanderjagt, D. J., A. Pastuszyn, R. S., Mounkaila, G., & Glew, M. M. 1998. The Texturometer: a new instrument for objective texture measurement. *Plant Foods for Human Nutrition* , 53, 57-69.

Freitas, R. A., P. C. Paula, J. P. A. Feitosa, S. Rocha, and M. R. Sierakwski. 2004. Amylose contents, rheological properties and gelatinization kinetics of yam (*Discorea alata*) and Cassava (*Manihot utilissima*) starches. *Carbohydr. Polymers*. 55: 3-8.

French, D. 1984. Organization of starch granules. In: *Starch: Chemistry and Technology*. Whistler,

Gallant DJ & Bouchet B. 1986. Ultrastructure of maize starch granules: a review. *J Food Microstructure*. 5: 141 – 155.

Gao, F., Li, D., Chong-hao, B., Mao, Z., Adhikari, B. 2014. Preparation and characterization of starch crosslinked with sodium trimetaphosphate and hydrolyzed by enzymes. *Carbohydrate Polymers*. 103, 310–318

- Gimeno, E., C. I. Moraru, and J. L. Kokini. 2004. Effect of xanthan gum and CMC on the structure and texture of corn flour pellets expanded by microwave heating. *Cereal Chemistry*. 81:100-107.
- Glinsmann WH. 1996. Functional foods in North America. *Nutr Rev*; 54:33S–7S.
- González-García, S. 2002. Estudio de la importancia del desarrollo de nuevos productos alimenticios funcionales en Europa. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia España.
- Gopalan, C., & Balasubramanian, B. V. 1971. Nutritive value of Indian foods. *Hyderabad, India: (National Institute of Nutrition) (revised and update by Narasinga Rao, B. S. Deosthale, Y. G. and Pant, K. C.*
- Guilbot, A., & Mercier, C. 1985. Starch. In: The Polysaccharides, O. Aspinall. *Academic Press*, New York, pp: 209-282.
- Guzmán-Maldonado H. 1992. Optimización de un procedimiento enzimático para la licuefacción y sacarificación del almidón mediante la metodología de superficie de respuesta. Tesis de Maestría. *CINVESTAV-IPN*. Irapuato, México.
- Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, RU, ... y Nazir, A. 2019. Avances en modificaciones químicas de almidones y sus aplicaciones. *Investigación de carbohidratos* , 476 , 12-35
- Hamer, H. M., Jonkers, D. M. A. E., Bast, A., Vanhoutvin, S. A. L. W., Fischer, M. A. G., Kodde, A. 2009. Butyrate modulates oxidative stress in the colonic mucosa of healthy humans. *Clinical Nutrition*, 28, 88–93.
- Hasjim J, Ai Y, Jane J. 2013. Novel applications of amylose-lipid complex as resistant starch type 5. In: Shi YC, Maningat CC, editors. *Resistant starch sources, applications and health benefits*. Chapter 4. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. p 79–94.
- Hasler CM.1996. Functional foods: the western perspective. *Nutrition Reviews*; 54:6S–10S.
- Hasler, Clare M. 2002. Functional Foods: Benefits, Concerns and Challenges—A Position Paper from the American Council on Science and Health. *Functional foods*.

- Hasler, Claire M. 2018. Alimentos funcionales: su papel en la prevención de enfermedades y la promoción de la salud. *Alimentos funcionales. Nutrición, Publicación del Panel de Expertos del Instituto de Tecnólogos de Alimentos sobre Seguridad Alimentaria y Nutrición.*
- Hekmat, S., Morgan, K., Soltani, M., Gough, R. 2015 Sensory evaluation of locally-grown fruit purees and inulin fibre on probiotic yogurt in mwanza, Tanzania and the microbial analysis of probiotic yogurt fortified with *Moringa oleifera* Journal Health Popul. Nutrition., pp. 60-67
- Heo, H., Lee, YK y Chang, YH (2017). Efecto de la reticulación sobre las propiedades fisicoquímicas y de digestibilidad in vitro del almidón de patata. Revista de Alimentos y Agricultura de los Emiratos , 463-469.
- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins, and its significance. *Carbohydrate Research*, 147: 342-347.
- Hood, L. F. 1982. Current concepts of starch structure. Pages 218-224 in: Food Carbohydrates. D. R. Lineback and G. E. Inglett, Eds. AVI, Westport, CT.
- Hylla, S., Gostner, A., Dusel, G., Anger, H., Bartram, H., Christl, S. U. 1998. Effects of resistant starch on the colon in healthy volunteers: Possible implications for cancer prevention. *American Journal of Clinical Nutrition*, 6, 136–142.
- Izidoro, D. R., Sierakowski, M. R., Isidoro, C. W., Fernandes de Souza, C., Scheer, A. P. 2011. Physical and chemical properties of ultrasonically, spray-dried green banana (*Musa cavendish*) starch. *Journal of Food Engineering*. 104, 639–648.
- Jane, J., Kasemsuwan, T., Leas, S., Zobel, H., & Robyt, J. F. 1994. Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starch/Starke*. 46:121-129
- Jane J, Shen L, Wang L & Maningat CC. 1992. Preparation and properties of small particle corn starch. *Cereal Chemistry* . 69: 280-283
- Jiang H, Jane J. 2013. Type 2 resistant starch in high-amylose maize starch and its development. In: Shi YC, Maningat CC, editors. Resistant starch sources, applications and health benefits. Chapter 2. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. p 23–42.

- Juárez-García, E., Agama-Acevedo, E., Sáyago-Ayerdi, S.G., Rodríguez-Ambriz, S.L., Bello-Pérez, L.A. 2006. Composition, digestibility and application in breadmaking of banana flour. *Plant Foods for Human Nutrition* 61, 131-137.
- Karthivashan, G., Arulselvan, P., Tan, S.W., Fakurazi, S., 2015. The molecular mechanism underlying the hepatoprotective potential of *Moringa oleifera* leaves extract against acetaminophen induced hepatotoxicity in mice. *Journal of Functional Foods* 17, 115–126
- Kiefer DA, Piccolo BD, Vaziri ND, Liu S, Lau WL, Khazaeli M, Nazertehrani S, Moore ME, Marco ML, Martin RJ, Adams SH. 2016. Resistant starch alters gut microbiome and metabolomic profiles concurrent with amelioration of chronic kidney disease in rats. *American Journal of Physiology*. 310:F857–F871.
- Krinsky NI. 1992. Mechanism of action of biological antioxidants. *Experimental Biology and Medicine*; 200: 248-254.
- Korkina LG & Afanasev IB. 1997. Antioxidant and chelating properties of flavonoids. *Advance Pharmacology*; 38: 151-163.
- Kumar, V., Kumar A.B., Kumar, M., Sahoo, J. 2011. Effect of banana and soybean hull flours on vacuum-packaged chicken nuggets during refrigeration storage. *International Journal of Food Science and Technology*. 46, 122–129.
- Kushwaha, S., Chawla, P., Kochhar, A., 2014. Effect of supplementation of drumstick (*Moringa oleifera*) and amaranth (*Amaranthus tricolor*) leaves powder on antioxidant profile and oxidative status among postmenopausal women. *Journal of Food Science and Technology* 51, 3464–3469
- Lau E, Zhou W & Henry C. 2016. Effect of fat type in baked bread on amylose-lipid complex formation and glycaemic response. *British Journal of Nutrition* . 115: 2122-2129.
- Leu, R. K. L., Hu, Y., Brown, I. L., & Young, G. P. 2009. Effect of high amylose maize starches on colonic fermentation and apoptotic response to DNA-damage in the colon of rats. *Nutrition & Metabolism*, 6(1), 11–20
- Lim, S., & Seib, P. A. 1993. Preparation and pasting properties of wheat and corn starch phosphates. *Cereal Chemistry*, 70, 137–144

- Limón D, Díaz A, Mendieta L, Luna F, Zenteno E & Guevara J. 2010. Los flavonoides: Mecanismo de acción, neuroprotección y efectos farmacológicos. *Mensaje Bioquímico*, Vol. XXXIV, 143 - 154.
- Lin, Mengfei.; Zhang, Junjie.; & Chen, Xiaoyang. 2018. Bioactive flavonoids in *Moringa oleifera* and their health-promoting properties. *Journal of Functional Foods*. 47: 469-479.
- Lineback, D.R. 1984. The starch granule organization and properties. *Bakers Digest*. 13: 16-21.
- Lineback, D.R., Rasper, V.F. 1988. Wheat Carbohydrates. *Wheat, Chemistry and Technology* ed. By Pomeranz, St. Paul, Minnesota, pp. 227-372.
- Luckett CR, Wang Y. 2012. Effects of β -amylolysis on the resistant starch formation of debranched corn starches. *Journal Agricultural Food Chemistry* 60:4751–7.
- Luengo Fernández, Emilio. 2007. Alimentos funcionales y nutraceuticos. Sección de Cardiología Preventiva y Rehabilitación. *Sociedad Española de Cardiología*.
- Ma, ZF, Ahmad, J., Zhang, H., Khan, I. y Muhammad, S. 2020. Evaluación de las propiedades fitoquímicas y medicinales de la moringa (*Moringa oleifera*) como potencial alimento funcional. *Revista Sudafricana de Botánica* , 129 , 40-46.
- MacAllister, R.V. 1979. Nutritive sweeteners made from starch. In: S. Tipson, and D. Horton. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*. Vol. 36. p. 15-56. Academic Press, Inc. New York. U.S.A.
- Magallanes-Cruz, P.A., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Tovar, J., Carmona-Garcia, Roselis. 2020. Effect of the addition of thermostable and non-thermostable type 2 resistant starch (RS2) in cake batters. *LWT*, 118, [108834]
- Mali, S., C. Ferrero, V. Redigonda, A. P. Belia, M. V. E. Grossmann, & N. E. Zaritzky. 2003. Influence of pH and hydrocolloids addition on yam (*Discorea alata*) starch pastes stability. *LWT*. 36: 475-481.
- Manach C., Scalbert A, Morand C, Rémésy C, Jiménez L. 2004. Polyphenols: food sources and bioavailability. *American Journal Clinical Nutrition*; 79: 727-747.

- Martínez-Álvarez, JR., Gómez-Candela, C., Villarino-Marín, AL. 2006. Obesidad y alimentos funcionales: ¿son eficaces los nuevos ingredientes y productos?. *REV MED UNIV NAVARRA*. VOL 50, No 4. 31-38
- Martínez-Flórez S, González-Gallego J, Culebras JM, Tuñón MJ. 2002. Flavonoids: properties and anti-oxidizing action. *Nutrición Hospitalaria*. 17: 271-278
- Martínez, J. I., & Villezca, B. P. 2003. La alimentación en México: un estudio a partir de la encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares. *Revista de información y Análisis*, 21, 26-37.
- Mazza, G. 2000. Alimentos funcionales: aspectos bioquímicos y de procesado.
- Martínez, MM, Rosell, CM, y Gómez, M. 2014. Modificación de la funcionalidad y digestibilidad de la harina de trigo a través de diferentes condiciones de extrusión. *Revista de Ingeniería de Alimentos*, 143, 74-79.
- Meena, AK; Ayushy Sachan, Ramanjeet Kaur, Bhavana Pal, Brijendra Singh. 2010. *Moringa oleifera*: A Review. *Journal of Pharmacy Research*. 3(4),840-842
- Moyo, B., Masika, P., Hugo, A., Muchenje, V. 2011. Nutritional characterization of *Moringa oleifera Lam.* leaves. *African Journal Biotechnology*. 10. 12925–12933.
- Muangnoi, C., Chingsuwanrote, P., Praengamthanachoti, P., Svasti, S., Tuntipopipat, S., 2012. *Moringa oleifera* pod inhibits inflammatory mediator production by lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 murine macrophage cell lines. *Inflammation* 35, 445–455.
- Muhammad, H.I., Asmawi, M.Z., Khan, N.A.K., 2016. A review on promising phytochemical, nutritional and glycemic control studies on *Moringa oleifera Lam* in tropical and sub-tropical regions. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine* 6, 896–902.
- Munhoz, M. P., F. H. Weber, and Y. K. Chang. 2004. Influencia de hidrocoloides na texture de gel de amido de milho. *Ciencia y Tecnología de alimentos, Campinas* 24(3): 403-406.
- Myllärinen, P., Buleon, A., Lahtinen, R. & Forsell, P. 2002. The crystallinity of amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymers*. 48: 41-48

- Nugent, A. P. 2005. Health properties of resistant starch. *British Nutrition Foundation, Nutrition Bulletin*, 30, 27–54.
- Oates C. G. 1997. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. *Trends in Food Science and Technology*. 8, 375-382
- Orallo F, Alvarez E, Camiña M, Leiro JM, Gómez E & Fernández P. 2002. The possible implication of trans-Resveratrol in the cardio- protective effects of long-term moderate wine consumption. *Moleculr Pharmacology*, 61: 294-302.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. 2018. Enfermedades no transmisibles. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>
- Ovando-Martinez, M., Sáyago-Ayerdi, S.G., Agama- Acevedo, E., Goñi, I.; Bello-Pérez, L.A. 2008. Unripe banana flour as an ingredient to increase the undigestible carbohydrates of pasta. *Food Chemistry* 113, 121-12.
- Oyeyinka, AT y Oyeyinka, SA. 2018. *Moringa oleifera* como fortificante alimentario: tendencias y perspectivas recientes. *Revista de la Sociedad Saudita de Ciencias Agrícolas* , 17 (2), 127-136.
- Palada, M. C. 1996. *Moringa (Moringa oleifera Lam.)*: A versatile tree crop with horticultural potential in the subtropical United States. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 31:794-797.
- Páramo-Calderón, D.E., Carillo-Ahumada, J., Juárez-Arellano, E.A., Bello-Pérez, L.A., Aparicio-Saguilán, A., Alvarez-Ramirez, J. 2016. Effect of cross-linking on the physicochemical, functional and digestibility properties of starch from Macho (*Musa paradisiaca* L.) and Roatan (*Musa sapientum* L.) banana varieties. *Starch/Stärke*, 68, 584–592.
- Páramo-Calderón, D.E; Aparicio-Saguilán, A; Aguirre-Cruz, A; Carillo-Ahumada, J.; Hernández-Uribe, J.P; Acevedo-Tello, S, Torruco-Uco, J.G. 2019. Tortilla added with *Moringa oleifera* flour: Physicochemical, texture properties and antioxidant capacity. *LWT - Food Science and Technology*. 409-415.
- Park, J. T., & Rollings, J. E. 1994. Effects of substrate branching characteristics on kinetics

- of enzymatic depolymerization of mixed linear and branched polysaccharides: I. Amylose/ amylopectin α -amylolysis. *Biotechnology and Bioengineering*, 44, 792e800.
- Paz, J. & Bosque, G. 2011. Investigación y desarrollo de producción de moringa para la obtención de biodiesel en México. Anexo b.pp. 2-7.
- Peñarrieta, J. Mauricio., Tejeda, Leslie., Mollinedo, Patricia., Vila, José L & Bravo, José A. 2014. Compuestos fenólicos y su presencia en alimentos. *Revista Boliviana de Química*. 31,2: 68 – 81.
- Pérez, S, Baldwin P. M., Gallant, D. 2009. Structural Features of Starch Granules I. Academic Press, 3rd Edition. Elsevier Inc.
- Peter, K. V. 1979. Drumstick, a multi-purpose vegetable. *Indian Horticulture*, 17-18.
- Porras-Loaiza, A. P. & López-Malo, A. 2009. Importancia de los grupos fenólicos en los alimentos. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*. 3-1: 121 – 134.
- Posada Jaramillo, M., Pineda-Salinas, V., & Agudelo-Ochoa, G. M. 2003. Los antioxidantes de los alimentos y su relación con las enfermedades crónicas.
- Pourmohammadi, K., Abedi, I., Javad, M., Hussein M., Torri, L. 2019. The effect of thermal processing and different concentrations of resistant starch on X-ray pattern, crystallization kinetics and morphological properties of noodles supplemented with wheat and corn resistant starch. *Journal of Food Measurement and Characterization*.
- Punia, S., Siroha, AK, Sandhu, KS y Kaur, M. (2019). Comportamiento reológico de las mezclas de almidón de trigo y almidón resistente a la cebada (tipo IV) y su potencial de producción de fideos de almidón. *Revista internacional de macromoléculas biológicas* , 130 , 595-604.
- Villarroel, Pía., Gómez, Camila., Vera, Camila., Torres, Jairo. 2018. Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista Chilena de Nutrición*; 45(3): 271-278.
- Qi ZH y Xu A. 1999. Starch-based ingredients for flavor encapsulation. *Cereal Foods World* . 30: 443-446

- Quiroga Ledezma, Carmen C. 2018. Starch Interactions With Native and Added Food Components. Chapter 20. 775-791.
- Quiñones, M.; Miguel, M.; & Aleixandre, A. 2012. Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*.27: 1, 76-89.
- Ratnayake, W. S., & Jackson, D. S. 2008. Thermal behavior of resistant starches RS 2, RS 3, and RS 4. *Journal of Food Science*, 73(5), 356–366.
- Rivas-González, Mayra, Méndez-Montealvo, M. Guadalupe C., Sánchez-Rivera, Mirna M., Núñez-Santiago, M. Carmen, & Bello- Pérez, Luis A. 2008. Caracterización morfológica, molecular y fisicoquímica del almidón de plátano oxidado y lintnerizado. *Agrociencia*, 42(5), 487-497.
- Rivero-Duarte, I. 2007. Desarrollo de mezclas de polietileno lineal de baja densidad y almidón de Yuca. Maestría. Universidad simón bolivar. Decanato de estudios profesionales. Coordinación de ingeniería de materiales.
- Romero-Bastida, C.A., Bello-Perez, L. A., Garcia, M. A., Martino, M. N., Solorza-Feria, J., Zaritzky, N. E. 2005. Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal and cold gelatinization from non-conventional sources of starches. *Carbohydrate Polymers*, 60, 235–244.
- Saifullah, R., Abbas, F. M. A., Yeoh, S.-Y. & Azhar, M. E. 2009. Utilization of green banana flour as a functional ingredient in yellow noodle. *International Food Reserach Journal*. 16: 373-379.
- Saini, R., Manoj, P., Shetty, N., Srinivasan, K., Giridhar, P. 2016. Relative bioavailability of folate from the traditional food plant *Moringa oleifera* L. as evaluated in a rat model J. Food Sci. Technol., 53, pp. 511-520.
- Sajilata, M., Singhal, R. S., & Kulkarni, & P. 2006. Resistant Starch— A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* , 5.
- Sang-Ho, Y., and Jay-Lin, J. 2002. Structural and physical characteristics of waxy and other wheat starches. *Carbohydrate Polymers*. 49: 297-305.

- Sarmiento Rubiano, L.A. 2006. Alimentos funcionales, una nueva alternativa de alimentación. *Revista ORINOQUIA*
- Seib, P. A., Woo, K. 1999. Food-grade starch resistant to alpha- amylase and method of preparing the same. U.S. Patent 5,855,946.
- Shevkani, K., Singh, N., Bajaj, R. and Kaur, A. 2017. Wheat starch production, structure, functionality and applications - a review. *International Journal Food Science and Technology*, 52, 38–58.
- Sosa, C. 2012. *Moringa oleíera*: La Respuesta a la Alimentación Mundial. *Pluma Libre*
- Smits, A. L., F. C. Ruhnau, J. F. Vliegenthart, & J. J. Van Soest. 1998. Ageing of starch based systems as observed with FT–IR and solid–state NMR spectroscopy. *Starch/Stärke*. 50: 478–483.
- Stading, M., Rindlav-Westling, A. & Gatenholm, P. 2001. Humidity-induced structural transitions in amylose and amylopectin films. *Carbohydrate Polymers*. 45: 209-217.
- Steven GB. 1995. Recent views on the biosynthesis of the plant starch granule. *Glycosci Glycotechnology* 7 (37): 405-415.
- Suflet, D. M., Chitanu, G. C., & Popa, V. 2006. Phosphorylation of polysaccharides: New results on synthesis and characterisation of phosphorylated cellulose. *Reactive and Functional Polymers*, 66(11), 1240–1249.
- Taweerutchana, R., Lumlerdkij, N., Vannasaeng, S., Akarasereenont, P., Sriwijitkamol, A., 2017. Effect of *Moringa oleifera* leaf capsules on glycemic control in therapy-naive type 2 diabetes patients: a randomized placebo controlled study. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine* 2017, 6581390.
- Tharanathan, R. N. 2005. Starch-value addition by modification. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 45: 371 – 384.
- Tester RF, y Debon, SJJ 2000. Recocido de almidón - una revisión. *Revista Internacional de Macromoléculas Biológicas*, 27 (1), 1-12.
- Tester RF, Karkalas I & Qi X. 2004. Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal Cereal Science*. 39: 151-165.

- Thomas DJ & Atwell WA. 1999. Starch structure. In: Thomas DJ y Atwell WA editors. *Starches. The American Association of Cereal Chemists*. 1-12 pp.
- Toutounji, M. E., Farahnakya, Santhakumar A. B., Oli P., Butardo V., Blanchard C. 2019. Intrinsic and extrinsic factors affecting rice starch digestibility. *Trends in Food Science & Technology*. 88,10–22
- Utrilla-Coello, R.G; Rodríguez-Huezo, M.E; Carrillo-Navas, H; Hernández-Jaimes C; Veron-Carter, E.J; Alvarez-Ramirez, J. 2014. In vitro digestibility, physicochemical, thermal and rheological properties of banana starches. *Carbohydrate Polymers*. 154-162.
- Vats, S., Gupta, T., 2017. Evaluation of bioactive compounds and antioxidant potential of hydroethanolic extract of *Moringa oleifera* Lam from Rajasthan, India. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 23, 239–248.
- Vázquez-León, L.A; Páramo-Calderón, D.E; Robles-Olvera, V.J; Valdés-Rodríguez, O.A; Pérez-Vázquez, A; García-Alvarado, M.A; Rodríguez-Jimenes, G.C. 2017. *European Food Research and Technology*.
- Velázquez-Zavala, M; Peón-Escalante, I. E; Zepeda-Bautista, R; Jiménez-Arellanes, M.A. 2016. Moringa (*Moringa oleifera* Lam.): potential uses in agriculture, industry and medicine. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. Vol XXII, 2. 95-116
- Verma, S. C., Benerji, R., & Nigam, G. M. 1976. Nutritional value of *Moringa oleifera*. *Current Science* , 45, 769-770.
- Whistler, R. L., & J. R. Daniel. 1984. Molecular structure of starch. *Starch: Chemistry and Technology*. p. 154-180. Academic Press, Inc. New York, U.S.A.
- Whistler, R. L., & BeMiller, J. N., 1997, Carbohydrate Chemistry for Food Scientists, *American Association of Cereal Chemistry*, St. Paul, MN
- Wongsagonsup, R., Pujchakarn, T., Jitrakbumrung, S., Chaiwat, W., Fuongfuchat, A., Varavinit, S., ... y Suphantharika, M. 2014. Efecto de la reticulación sobre las propiedades fisicoquímicas del almidón de tapioca y su aplicación en productos de sopa. *Polímeros de carbohidratos* , 101 , 656-665.
- Wurzburg, O.B. in: O.B. 1986. Wurzburg (Ed.), *Modified Starches: Properties and Uses*,

CRC Press, Boca Raton, FL.

- Xia, J., Zhu, D., Wang, R., Cui, Y., Yan, Y. 2018. Crop resistant starch and genetic improvement. *Theoretical and Applied Genetics*. 131:2495–2511
- Zamudio-Flores, P. B. 2008. Caracterización estructural de películas elaboradas con almidón modificado de plátano y con quitosano. Tesis Doctorado. CEPROBI.
- Zamudio-Flores, P., Vargas-Torres, A., Gutiérrez-Meraz, F. & Bello-Pérez, L. 2010. Caracterización fisicoquímica de almidones doblemente modificados de plátano. *Agrociencia*, 44, 283-295
- Zhang, P., Whistler, R.L., BeMiller, J.N., and Hamaker, B.R. 2005. Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility review. *Carbohydrate Polymers*. 59, 443-458.
- Zhang, P., Hamaker, B.R. 2012. Banana starch structure and digestibility *Carbohydrate Polymers*. 87, 1552– 1558
- Zhang, B., Dhital, S., Gidely, M.J. 2013. Synergistic and antagonistic effects of α - amylase and amyloglucosidase on starch digestion. *Biomacromolecules* 14, 1945-1954.
- Zhao J y Whistler RL. 1994. Spherical aggregates of starch granules as flavor carriers. *Food Technology* . 48 (7): 104-105.
- Zhao J y Whistler RL. 1994b. Isolation and characterization of starch from amaranth flour. *Cereal Chemistry*. 71: 392-393.
- Zhu, F. 2015. Interactions between starch and phenolic compound. *Trends in Food Science & Technology*. 43: 129-143
- Zobel, H. F. 1988. Molecules to granule: a comprehensive starch review. *Starch/Starke*,. 40, 40-50.

11 ANEXOS

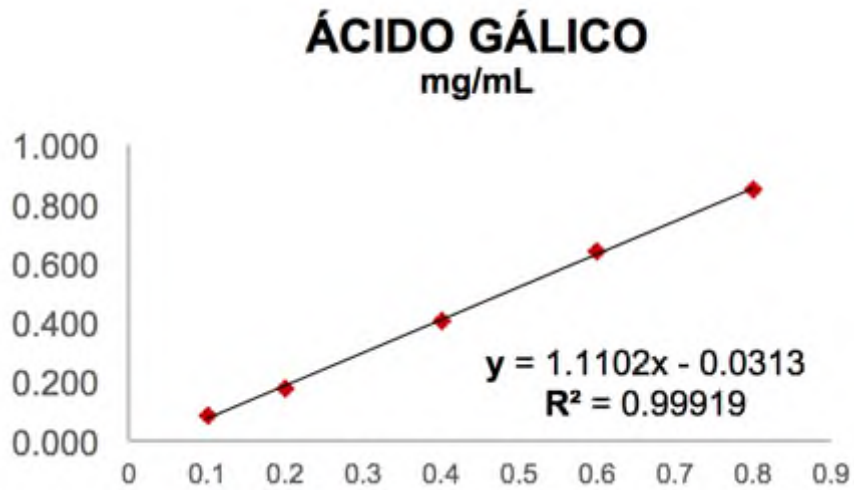


Figura 19. Curva de calibración Ácido Gálico

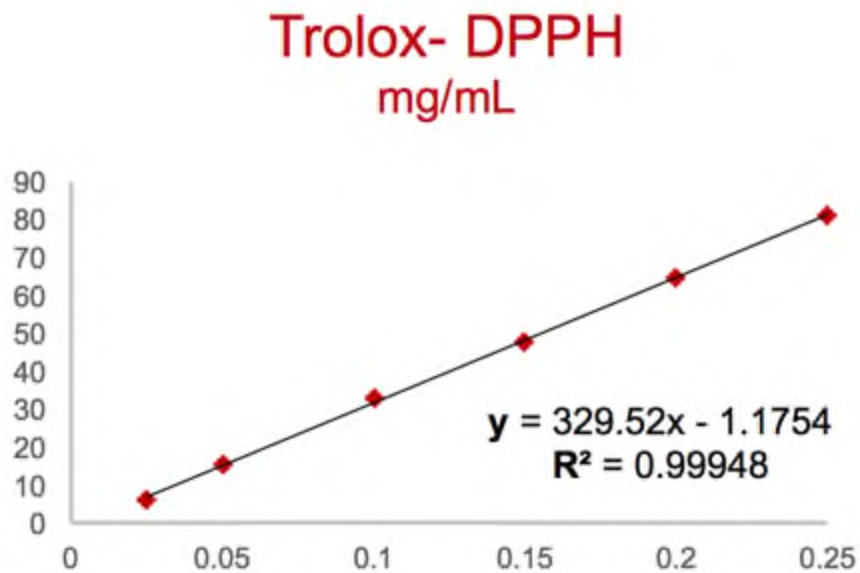


Figura 20. Curva de calibración Trolox - DPPH



Figura 21. Elaboración de sopas instantánea



9



10



11

Figura 22. Producto final, almacenamiento y reconstitución