



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**Facultad de Ciencias de la Nutrición y Gastronomía**  
**Maestría en Ciencias de la Nutrición y Alimentos Medicinales**



**Caracterización tecnofuncional, nutricional y nutracéutica de  
pasta alimenticia a base de amaranto / maíz azul. Actividad  
hipoglucemiante**

**TESIS**

**Como requisito para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA NUTRICIÓN Y  
ALIMENTOS MEDICINALES**

**Presenta:**

**LN. Eduardo Alberto Vargas Zamudio**

**Directores:**

**Dr. Alvaro Montoya Rodríguez**

**Dra. Evelia María Milán Noris**

Culiacán, Sinaloa

Octubre, 2024



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios  
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.  
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## **UAS-Dirección General de Bibliotecas**

### **Repositorio Institucional Buelna**

#### **Restricciones de uso**

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial  
Compartir Igual, 4.0 Internacional



## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Facultad de Ciencias de la Nutrición y Gastronomía, a la que le tengo un profundo cariño, por ofrecerme la oportunidad de formarme primeramente como Licenciado en Nutrición y ahora como Maestro en Ciencias de la Nutrición. De la misma manera, agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) ahora Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo otorgado durante el periodo de la maestría. A todas las personas que hicieron y siguen haciendo posible que la Maestría en Ciencias de la Nutrición y Alimentos siga funcionando y se mantenga como un posgrado de calidad, no se detengan y sigan formando más personas interesadas en la ciencia.

También agradezco a la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Sinaloa por, desde hace mucho tiempo, permitirme utilizar sus instalaciones en el Laboratorio 18 para llevar a cabo todos los experimentos que se abordan en esta investigación.

A mis directores de tesis, el Dr. Alvaro Montoya Rodríguez y la Dra. Evelia María Milán Noris que siempre han estado allí para ayudarme a sacar el trabajo e incluso con todo el tiempo pasado, siempre me dieron la oportunidad de concluir con este proyecto.

A los miembros de mi comité de tesis la Dra. Keila Milán por ayudarme muchísimas veces durante el experimental con las dudas que surgieran, aportar positivamente a la investigación, por todas las enseñanzas que me transmitió y confiar al momento de utilizar el material y las instalaciones (también por las risas que se escuchan de un lugar a otro). A la Dra. Eslim Sicairos, por estar allí al tanto de las cosas que sucedían en la investigación, por las revisiones, por los consejos, la ayuda en laboratorio, por los momentos de risa y, sobre todo, por ser una amiga de varios años, muchas gracias.

A mis compañeros del laboratorio 18 (la rosca pa los compas), a quienes algunos conozco desde hace varios años y otros que conocí durante el periodo de investigación de la tesis. Me han acompañado en este proceso y eso lo aprecio mucho. La vieja escuela: Evelyn, Charly, Radamés, Paulina, Anahí. Y a la nueva escuela: Víctor, Fedra C., Carlos (Martínez), Brayan, Sam, Valeria, Daniel, Paulina, Fer, Alex Ríos. En especial a Jocelyn y Armando (A.K.A. Chapu) que me acompañaron por gran parte del experimental. A todos, muchas gracias.

A mis amigos “los kinis” y a Azucena por estar conmigo en todos los momentos necesarios.

Por último y muy importantes, a los miembros de mi familia. A mi hermana Ana Cristina, mi madre Claudia, mi tía (segunda madre) Lupita y mi hermano Sergio Luis, que siempre han respetado todas mis decisiones y han estado allí para apoyarme. Los amo con todo mi corazón.

## DEDICATORIA

*A los nutriólogos que, como yo,  
lo suyo no es estar en un consultorio*

## RESUMEN

Las enfermedades crónicas son la principal causa de muerte en el mundo; en México la Diabetes Mellitus ha incrementado su prevalencia en los últimos años convirtiéndose en uno de los principales problemas de salud pública. Se ha propuesto el uso de tecnologías emergentes, como la extrusión, en el desarrollo de alimentos para obtener harinas precocinadas con buen valor nutricional, además de actividad biológica y antioxidante importante. El amaranto y maíz azul son granos con compuestos bioactivos que se han integrado en una pasta alimenticia extrudida. Sin embargo, a dicha pasta no se han definido sus propiedades tecnofuncionales, nutricionales, nutracéuticas, así como su potencial efecto hipoglucemiante. El objetivo de esta investigación fue caracterizar las propiedades tecnofuncionales, nutricionales, nutracéuticas e hipoglucemiantes de una pasta alimenticia a base de amaranto/maíz azul. Se obtuvieron dos pastas, una pasta optimizada de maíz azul y amaranto (PAAMAO) y otra con 10% de sémola adicionada (POS), ambas con harina de amaranto y maíz azul en partes iguales. Las condiciones de extrusión fueron obtenidas mediante la optimización del proceso con variables de respuesta temperatura (70-140°C) y contenido de humedad (20-40%) para obtener la mayor capacidad antioxidante. Las pastas fueron extrudidas a una temperatura de 82°C con contenido de humedad de 26% y velocidad de tornillo de 50 rpm. Se definieron las propiedades tecnofuncionales (calidad de la pasta), propiedades nutricionales y nutracéuticas (propiedad hipoglucemiante *in vitro*) de harina de amaranto y maíz azul (HAMA), PAAMAO, POS, pasta comercial integral de trigo PCIT y las fracciones *in* y *out* obtenidas mediante la digestión simulada *in vitro* de POS. Se obtuvieron valores de tiempo óptimo de cocción (TOC) de 14.50 (minutos:segundos) y pérdida de sólidos por cocción (PSC) de 24.10 y 19.06% para PAAMAO y POS, respectivamente. Los valores fueron mayores que las mostradas por la PCIT que mostró valores de 11.50 y 9.80% para TOC y PSC, respectivamente. El porcentaje de proteína de las muestras fue de

11.26% para HAMA, 11.52% para PAAMAO y 11.09% para POS. Los resultados de actividad antioxidante total mostraron una disminución después de la extrusión (PAAMAO 14464, POS 12652, PCIT 9618 vs HAMA que obtuvo 18844  $\mu$ moles equivalentes de Trolox/100g ( $\mu$ mol ET/100g) bs base seca (bs)), mientras que los digeridos de POS mostraron valores de 5853 para la fracción *in* y de 4.6  $\mu$ mol ET/100g para la fracción *out*. El porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -amilasa para PAAMAO, POS y PCIT fue de 41.11, 41.31 y 8.28% respectivamente. Los resultados de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa para PAAMAO, POS y PCIT fueron de 63.57, 42.94 y 26.58%, respectivamente. La digestión disminuyó la actividad inhibitoria de  $\alpha$ -amilasa. Sin embargo, se mantuvo la actividad inhibitoria de  $\alpha$ -glucosidasa mostrando valores de inhibición de 16.66% para la fracción *in* y de 22.51% para la fracción *out*. Añadir ingredientes funcionales no convencionales a la pasta, como el amaranto y maíz azul, son una alternativa interesante para el mejoramiento de las capacidades funcionales del alimento y como alternativa para utilizar las pastas como un alimento funcional en la prevención y/o control de enfermedades crónicas.

**Palabras clave:** Amaranto, maíz azul, pasta, actividad hipoglucemiante.

## INDICE

|  |      |
|--|------|
| DERECHOS DE AUTOR .....                                  | i    |
| APROBACIÓN .....   | ii   |
| AGRADECIMIENTOS .....                                    | iii  |
| DEDICATORIA .....  | v    |
| RESUMEN .....  | vi   |
| INDICE .....   | viii |
| LISTA DE FIGURAS .....                                   | xiv  |
| LISTA DE TABLAS .....                                    | xv   |
| ANEXOS .....   | xvii |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                    | 18   |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....                           | 21   |
| 2.1 Enfermedades crónicas .....                          | 21   |
| 2.2 ECNT: Diabetes Mellitus.....                         | 21   |
| 2.2.1 Epidemiología de la Diabetes Mellitus .....        | 22   |
| 2.2.2 Diagnóstico de diabetes mellitus .....             | 23   |
| 2.2.3 Metabolismo normal de la glucosa .....             | 23   |
| 2.2.4 Fisiopatología de la diabetes .....                | 25   |
| 2.3 Amaranto ( <i>Amaranthus hypochondriacus</i> ) ..... | 26   |
| 2.3.1 Composición nutricional.....                       | 28   |
| 2.4 Maíz ( <i>Zea mays</i> ).....                        | 31   |
| 2.4.1 Antecedentes generales .....                       | 31   |
| 2.4.2 Producción de maíz .....                           | 31   |



|  |    |
|--|----|
| 2.4.3 Maíces pigmentados.....  | 31 |
| 2.5 Productos y formas de consumo (amaranto y maíz) .....  | 32 |
| 2.6 Extrusión.....   | 34 |
| 2.6.1 Parámetros del proceso de extrusión .....  | 35 |
| 2.7 Pasta .....  | 36 |
| 2.8 Actividad hipoglucemiante en alimentos.....  | 37 |
| 2.8.1 Antecedentes de actividad hipoglucemiante en amaranto. 38  |    |
| 2.8.2 Antecedentes de actividad hipoglucemiante en maíz azul. 39   |    |
| 3. HIPÓTESIS.....  | 41 |
| 4. OBJETIVOS.....  | 42 |
| 4.1 Objetivo general.....  | 42 |
| 4.2 Objetivos específicos .....  | 42 |
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS.....   | 43 |
| 5.1 Materiales .....   | 43 |
| 5.2 Elaboración de la pasta .....  | 43 |
| 5.3 Propiedades tecnofuncionales.....  | 44 |
| 5.3.1 Calidad de cocción de la pasta (tiempo óptimo de cocción y<br>pérdida de sólidos por cocción)..... | 44 |
| 5.3.2 Diferencia total de color ( $\Delta E$ ).....  | 44 |
| 5.3.3 Índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua<br>.....                               | 45 |
| 5.3.4 pH .....   | 45 |
| 5.4 Propiedades nutricionales .....  | 46 |
| 5.4.1 Proteínas .....  | 46 |
| 5.4.2 Lípidos .....  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| 5.4.3 Cenizas.....   | 46 |
| 5.4.4 Carbohidratos .....  | 46 |
| 5.4.5 Digestibilidad proteínica <i>in vitro</i> .....  | 47 |
| 5.4.6 Perfil de aminoácidos.....   | 47 |
| 5.4.7 Relación de eficiencia proteica calculada (C-PER),<br>puntuación de aminoácidos corregida por digestibilidad de proteínas<br>(PDCAAS)..... | 48 |
| 5.5 Propiedades nutraceuticas .....  | 48 |
| 5.5.1 Extracción de fitoquímicos libres .....  | 48 |
| 5.5.2 Extracción de fitoquímicos ligados.....  | 49 |
| 5.5.3 Digestión gastrointestinal simulada <i>in vitro</i> .....  | 49 |
| 5.5.4 Extracción de compuestos metanólicos en digeridos de pasta<br>alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada .....                         | 50 |
| 5.5.5 Actividad antioxidante (AAOx) .....  | 50 |
| 5.5.6 Compuestos fenólicos.....  | 51 |
| 5.5.7 Flavonoides .....  | 51 |
| 5.6 Potencial biológico.....   | 52 |
| 5.6.1 Extracción total de proteínas de las harinas sin digerir .....   | 52 |
| 5.6.2 Medición de proteína soluble (DC- Protein Assay) .....   | 52 |
| 5.6.3 SDS-PAGE .....   | 53 |
| 5.6.4 Actividad hipoglucemiante .....  | 54 |
| 5.7 Análisis estadístico .....   | 55 |
| 6. RESULTADOS.....   | 56 |
| 6.1 Obtención de pastas mediante extrusión.....  | 56 |

|   |    |
|---|----|
| 6.2 Características de calidad de cocción de la pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAMAAO), pasta optimizada con sémola (POS) y una pasta comercial integral de trigo (PCIT). .....  | 56 |
| 6.3 Propiedades tecnofuncionales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).....   | 56 |
| 6.4 Composición proximal de amaranto, maíz azul, harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta optimizada con sémola (POS). DPIV de harinas y pastas. ....   | 61 |
| 6.5 Efecto de la extrusión en la capacidad antioxidante total evaluada mediante método de capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC), en harina de amaranto y maíz azul (HAMA), en una pasta de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS), una pasta comercial integral de trigo (PCIT) y digestión de POS (fracción <i>in</i> y <i>out</i> )..... | 64 |
| 6.6 Efecto de la extrusión sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT). 67   |    |
| 6.7 Efecto de la extrusión en el contenido de flavonoides totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT) .....   | 69 |
| 6.8 Efecto de la extrusión y digestión <i>in vitro</i> sobre el contenido de proteína soluble (PS) .....  | 71 |
| 6.9 Perfil de proteínas por SDS-PAGE .....  | 73 |

|  |    |
|--|----|
| 6.10 Actividad hipoglucemiante .....   | 73 |
| 6.10.1 Actividad hipoglucemiante de $\alpha$ -amilasa.....   | 73 |
| 6.11.2 Actividad hipoglucemiante de $\alpha$ -glucosidasa .....  | 76 |
| 7. DISCUSIÓN.....  | 77 |
| 7.1 Características de calidad de cocción de la pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAMAAO) y una pasta comercial integral de trigo (PCIT).....  | 77 |
| 7.2 Propiedades tecnofuncionales de harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo PCIT.....   | 78 |
| 7.3 Composición proximal, digestibilidad proteínica <i>in vitro</i> , perfil de aminoácidos y C-PER de harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).....  | 81 |
| 7.4 Actividad antioxidante por capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC) de una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT), digeridos de POS fracción disponible en el colon <i>In</i> y fracción basolateral <i>Out</i> . ..... | 83 |
| 7.5 Efecto de la extrusión sobre el contenido de compuestos fenólicos totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).....  | 84 |
| 7.6 Efecto de la extrusión en el contenido de flavonoides totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo (PCIT) .....   | 85 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.7 Efecto de la extrusión y digestión simulada <i>in vitro</i> sobre el contenido de proteína soluble (PS).....   | 86  |
| 7.8 Perfil de proteínas por SDS-PAGE .....   | 86  |
| 7.9 Actividad hipoglucemiante. Inhibición <i>in vitro</i> de $\alpha$ -amilasa y $\alpha$ -glucosidasa de HAMA, PAAMAO, POS, PCIT, fracción <i>in</i> y fracción <i>out</i> .. | 87  |
| 8. CONCLUSIONES .....  | 90  |
| 9. RECOMENDACIONES.....  | 91  |
| 10. REFERENCIAS .....  | 92  |
| ANEXOS .....   | 110 |

## LISTA DE FIGURAS

| <b>Figura</b> | <b>Descripción</b>  | <b>Página</b> |
|---------------|---|---------------|
| 1             | Granos de amaranto ( <i>Amaranthus hypochondriacus</i> ).   | 28            |
| 2             | Granos de maíz ( <i>Zea Mays</i> ) raza Elotero de Sinaloa.   | 34            |
| 3             | Pasta alimenticia de amaranto y maíz azul.  | 58            |
| 4             | Perfil de proteínas (SDS-PAGE) de harinas de mezcla amaranto maíz azul, pasta alimenticia de amaranto maíz azul optimizada, digeridos <i>in</i> (fracción disponible en el colon) y <i>out</i> (fracción basolateral) de la pasta optimizada. STD: Estándar de peso molecular de proteínas. HAMA: harina de amaranto y maíz azul. PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. POS: pasta optimizada con sémola. PD: pasta digerida. IN: fracción disponible en el colon. OUT: fracción basolateral. | 75            |

## LISTA DE TABLAS

| Tabla | Descripción  | Página |
|-------|--|--------|
| 1     | Comparación de las características nutrimentales de los granos de amaranto con otros cereales.   | 30     |
| 2     | Características de calidad de cocción de la pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAMAAO), pasta optimizada con sémola (POS) y una pasta comercial integral de trigo (PCIT).   | 59     |
| 3     | Propiedades tecnofuncionales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).  | 60     |
| 4     | Composición proximal de amaranto, maíz azul, harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).   | 63     |
| 5     | Efecto de la extrusión y digestión <i>in vitro</i> sobre el porcentaje de digestión proteínica <i>in vitro</i> (DPIV).   | 64     |
| 6     | Calificación química, aminoácidos limitantes, PDCAAS, C-PER, pBV y contenido de aminoácidos esenciales en harina de amaranto y maíz azul (HAMA) y pasta optimizada con sémola (POS).   | 66     |
| 7     | Efecto de la extrusión en la capacidad antioxidante total evaluada mediante método ORAC en una pasta de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta optimizada con sémola (POS).  | 67     |
| 8     | Efecto de la extrusión sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT). | 69     |
| 9     | Efecto de la extrusión en el contenido de flavonoides totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT) <sup>1</sup> .     | 71     |
| 10    | Efecto de la extrusión y digestión <i>in vitro</i> sobre el contenido de proteína soluble (PS).  | 73     |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 11 | Actividad hipoglucemiante de harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola de trigo (POS), pasta comercial integral de trigo (PCIT) y digeridos de POS (fracción disponible en el colon <i>in</i> y fracción basolateral <i>out</i> ). | 76 |
|----|--|----|



## ANEXOS

| Anexo | Descripción  | Página |
|-------|--|--------|
| 1     | Certificado de participación en congreso internacional virtual FIRST: Food Improved by Research, Science & Technology del Institute of Food Technologists, en modalidad póster titulado “Nutritional, Techno-Functional and Nutraceutical Characterization of an Amaranth/Blue Maize Food Pasta”   | 111    |
| 2     | Certificado de participación en el congreso “XLII Encuentro Nacional: Desafíos actuales en la investigación y docencia en ingeniería química” de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ) por la presentación en modalidad cartel del trabajo titulado: “Caracterización Nutricional, Tecnofuncional y Nutracéutica de una Pasta de Amaranto/Maíz Azul” | 112    |

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las enfermedades crónicas son señaladas como la primera causa de muerte en el mundo (Graf y col., 2015). La Diabetes Mellitus, ha incrementado su presencia en los últimos años convirtiéndose en un problema de salud en México y en el mundo en general (INSP, 2018; Basto-Abreu y col., 2020), su control y manejo es complicado debido a la red y conexiones de diversos factores de riesgo, entre los que encontramos la alimentación, la cual juega un papel importante en su tratamiento y prevención. De aquí surge la idea de utilizar productos alimenticios que confieran beneficios específicos para la salud (Graf y col., 2015), llamados “alimentos funcionales” (Bigliardi y col., 2013), los cuales han ganado importancia alrededor del mundo desde la creación del término en 1984. Estos alimentos tienen el potencial de mejorar el bienestar general del cuerpo y reducir el riesgo de enfermedades (Bigliardi y col., 2013.; Graf y col., 2015).

De esta manera, se ha propuesto el desarrollo de alimentos que al ser consumidos regularmente en cantidades suficientes concedan un efecto beneficioso en el organismo o a la salud más allá de solamente nutrir, sustituyendo a otros consumidos habitualmente, funcionando como una alternativa alimenticia más saludable que la oferta actual, los cuales pueden reducir el riesgo de una o más enfermedades crónicas (Srivastava, 2018; Granato y col., 2020). Estos alimentos pueden ser obtenidos mediante el uso de diversas tecnologías, entre las que destaca la extrusión, la cual se ha utilizado para el procesamiento de alimentos con alta temperatura por tiempo corto (HTST), permitiendo la obtención de harinas precocinadas con un valor nutricional y capacidad antioxidante mejorados, que al consumirse se podrían traducir en un efecto positivo en el organismo (Montoya-Rodríguez y col., 2015). Previamente se han investigado las actividades biológicas de algunos componentes de harinas extrudidas, entre estas se ha estudiado la capacidad antihipertensiva, antioxidante, antitrombótica, antiinflamatoria (Montoya-

Rodríguez y col., 2015) e hipoglucemiante (Leonard y col., 2013; Yao y col., 2020).

En los últimos años se ha impulsado el estudio de algunos alimentos como el amaranto y maíz azul. El amaranto es un alimento que posee un alto valor nutricional, particularmente por su contenido balanceado de aminoácidos esenciales, fibra dietaria y capacidad antioxidante. El amaranto contiene una mayor cantidad de aminoácidos esenciales como la lisina, un aminoácido limitante en muchos cereales (Cornejo y col., 2019). De igual manera, el maíz azul es un alimento ampliamente consumido en México el cual ha sido identificado como una fuente importante de compuestos bioactivos, los cuales han mostrado múltiples roles funcionales como la protección ante el estrés oxidativo, actividad anti mutagénica incrementada e inhibición de carcinogénesis colorrectal (Mora-Rochín y col., 2016), así como también potenciales propiedades hipoglucemiantes (Nile y col., 2014; Smorowska y col., 2021). Debido a las propiedades benéficas que estos dos granos brindan al consumirlos, se ha sugerido la integración de amaranto y maíz azul en una pasta alimenticia extrudida, la cual es una excelente opción de alimento al ser de bajo costo y tener en potencia una buena aceptación entre los consumidores al ser sustitutos de pastas tradicionales (hechas de trigo), además de ser considerada un excelente vehículo para nutrientes y compuestos bioactivos (Nilusha y col., 2019). Sin embargo, durante el proceso de extrusión se puede llegar a modificar o degradar algunos de los fitoquímicos naturales de los alimentos, por lo que es necesario realizar una evaluación de las propiedades tecnofuncionales, nutricionales y nutracéuticas del producto para definir su potencial impacto en la salud (Mora-Rochin y col., 2010), con lo cual pueda tener efecto en ECNT como lo es la diabetes mellitus tipo.

La diabetes mellitus es una enfermedad que ha pasado a ocupar el tercer lugar como causa de muerte general en México (INSP, 2018). Esta enfermedad se refiere a una familia de desórdenes que se caracterizan por

una hiperglicemia crónica a causa de una resistencia a la insulina y deficiencia de insulina (Dendup y col., 2018; Goodarzi, 2014). Hay alimentos con la capacidad de mostrar actividad hipoglucemiante mediante la inhibición de las enzimas digestivas  $\alpha$ -amilasa (pancreática) y  $\alpha$ -glucosidasa (intestinal), ocasionando que la absorción de carbohidratos sea más lenta (Smorowska y col., 2021).

La evidencia científica muestra que el amaranto y maíz azul muestran potencial actividad hipoglucemiante (Chmelík y col., 2019; Conforti y col., 2005; Girija y col., 2011; Huang y col., 2015; Kehinde y col., 2020; Kumar Sri y col., 2010; Montoya-Rodríguez y col., 2015; Neder-Suárez y col., 2021; Nile y col., n.d.; Nkobole y col., 2021; Smorowska y col., 2021). Sin embargo, no existen estudios que muestren el efecto del procesamiento de estos alimentos mediante extrusión en una pasta de amaranto y maíz azul sobre sus propiedades tecnofuncionales, nutricionales, nutracéuticas e hipoglucemiantes. El objetivo de esta investigación fue caracterizar las propiedades tecnofuncionales, nutricionales, nutracéuticas e hipoglucemiante de una pasta alimenticia a base de amaranto/maíz azul.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Enfermedades crónicas**

Las enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT) son uno de los mayores retos de salud a nivel mundial debido a su gran número de casos afectados, su elevada morbilidad y mortalidad. Mundialmente, las ECNT cada año cobran la vida de al menos 41 millones de personas, lo equivalente al 71% de las muertes totales (OMS, 2021). Estas enfermedades surgen por diversos factores, entre los que se han identificado que pueden ser genéticos, fisiológicos, ambientales y conductuales (Chávez-Valenzuela y col., 2018). La carga que las ECNT ejercen se extiende más allá de la morbilidad y mortalidad, ya que generan un enorme impacto social y empobrecimiento debido a los costos que implican en el sistema de salud (largos y caros), además de afectar la vida de las personas y el potencial humano (OMS, 2021). Entre las ECNT identificamos a la enfermedad coronaria, infartos, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, cáncer, enfermedades de los riñones y diabetes mellitus tipo 2 por mencionar las más importantes (Chávez-Valenzuela y col., 2018; Jaspers y col., 2014; Paulina y col., 2017; UNICEF, 2018; OMS, 2021) Para combatir estas enfermedades, se buscan alternativas alimenticias que contribuyan al mejoramiento de este tipo de condiciones, como lo es el consumo de granos como el amaranto y maíz azul (Phillips y col., 2019).

### **2.2 ECNT: Diabetes Mellitus**

Hace poco más de 20 años, las enfermedades crónicas no transmisibles, pasaron a ocupar los primeros lugares como causa de muerte general. El primer lugar lo ocupan las enfermedades del corazón, el segundo lugar los tumores malignos y el tercero la Diabetes mellitus (INSP, 2018).

Diabetes mellitus se refiere a una compleja familia de desórdenes que se caracterizan por una elevada hiperglicemia crónica (Goodarzi, 2014) , lo cual causa que el cuerpo no produzca insulina (deficiencia de insulina) o no

pueda utilizarla (resistencia a la insulina) (Dendup y col., 2018). Actualmente es considerada por la Organización Mundial de la Salud como una amenaza mundial, ya que es un padecimiento no curable, crónico y progresivo, el cual requiere de estrategias reductoras de riesgo que deben ser implementadas por profesionales de la salud capacitados para el manejo de la enfermedad, las cuales deben ir más allá de solamente el control glicémico y para ser efectiva deberá contar con los medicamentos e insumos necesarios, así como educación nutricional con participación activa y comprometida de la persona que la padece para el control adecuado de la enfermedad. Las intervenciones deben ser adaptadas y personalizadas para cada paciente y estas son críticas para prevenir las complicaciones agudas y reducir el riesgo de complicaciones a largo termino. Esta enfermedad tiene dos clasificaciones, tipo 1 y tipo 2, que tienen diferencias en su patogénesis (Goodarzi, 2014; NOM-015; ADA, 2022).

Los síntomas clásicos de la diabetes incluyen la poliuria (exceso de urinación), polidipsia (exceso de sed), polifagia (hambre), debilidad y una pérdida inexplicable de peso que resulta de la diuresis osmótica (exceso de glucosa en la orina, que causa poliuria) (Goodarzi, 2014).

### **2.2.1 Epidemiología de la Diabetes Mellitus**

La carga de la diabetes está incrementando rápidamente a nivel mundial, siendo un reto socioeconómico y de salud muy grande (Dendup y col., 2018). Se estima que el número de personas con diabetes sería de 366 millones de personas para el año 2030, 592 millones para 2035 y de 642 millones para el año 2040 (Basto-Abreu y col., 2020; Dendup y col., 2018; Goodarzi, 2014). México se encuentra entre los 10 países con mayor número de personas que viven con Diabetes (INSP, 2018). De acuerdo con datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición, la diabetes mellitus por diagnóstico previo aumentó de 5.8% en el año 2000, a 7.0% en el año 2006, a 9.2% en el año 2012, a 10.3% en el año 2018 y a 10.6% en 2020, con una cifra que asciende a poco más de 8.8 millones de personas con diabetes mellitus. En

México el 11.4% de las mujeres y el 9.1% de los hombres mayores de 20 años tiene diabetes previamente diagnosticada. En Sinaloa, el porcentaje de personas mayores de 20 años con diagnóstico previo de diabetes es del 10.7% (Rojas-Martínez y col., 2018; INSP, 2020).

### **2.2.2 Diagnóstico de diabetes mellitus**

El diagnóstico de diabetes mellitus se lleva a cabo por la medición de ciertos parámetros en sangre, tres de los criterios se basan en mediciones del plasma y uno de la glucosilación de una fracción de hemoglobina (A1c) (Goodarzi, 2014). La “Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-015-SSA2-2018, para la prevención, detección, diagnóstico, tratamiento y control de la Diabetes Mellitus” establece los puntos de corte para diagnosticar diabetes de acuerdo a la prueba que se realice, la norma menciona también los valores para una etapa previa a la diabetes la cual se menciona como prediabetes, la cual es considerada si la glucemia plasmática en ayuno es  $\geq 100$  mg/dL y  $\leq 125$  mg/dL de glucosa normal en ayuno y/o cuando la glucosa dos horas poscarga oral de 75 g de glucosa anhidra es  $\geq 140$  mg/dL y de  $\leq 199$  mg/dL intolerancia a la glucosa y/o cuando la HbA1c está entre 5.7% y 6.4%, mientras que para diabetes mellitus se establece que si se cumple cualquiera de los siguientes criterios: presencia de síntomas característicos o una glucemia plasmática casual  $\geq 200$  mg/dL; glucemia plasmática en ayuno  $\geq 126$  mg/dL; o bien glucemia plasmática  $\geq 200$  mg/dL a las dos horas después de una carga oral de 75 g de glucosa anhidra disuelta en agua y prueba de HbA1c mayor o igual a 6.5%. Para confirmar el diagnóstico final, se deben confirmar los resultados repitiendo la prueba otro día.

### **2.2.3 Metabolismo normal de la glucosa**

La insulina es una hormona secretada por las células  $\beta$  de los islotes pancreáticos, es fundamental para el control normal de los niveles de glucosa. En estas células, la proinsulina se procesa a insulina mediante la escisión y eliminación de un péptido de conexión (péptido C), lo que da como resultado

la producción de insulina madura, que consta de una cadena A (21 aminoácidos) unida a una cadena B (30 aminoácidos) mediante dos enlaces disulfuro. La capacidad de secreción de insulina está determinada por la función de las células  $\beta$  y la masa de las células  $\beta$ . La insulina se secreta en dos fases: la primera fase de secreción de insulina, a través de la exocitosis de la insulina inmediatamente disponible, alcanza un pico y disminuye rápidamente; mientras que la segunda fase de la secreción de insulina, a través de la liberación de insulina de los gránulos más profundos en las células  $\beta$  produce un pico de insulina más amplio y duradero (Goodarzi, 2014).

La glucosa entra a las células  $\beta$  a través del transportador GLUT2; esta glucosa se metaboliza a piruvato a través de glucólisis y en la mitocondria a acetil coenzima A, generando adenosina trifosfato, el cual desencadena el cierre del canal de potasio sensible a ATP llevando a la despolarización de la membrana plasmática. Esto abre los canales de calcio permitiendo el flujo de calcio el cual promueve el movimiento de gránulos que contienen insulina a la superficie celular liberando insulina. La unión de la insulina a las subunidades alfa estimula la actividad tirosina quinasa de las subunidades beta, lo que da como resultado la auto-fosforilación y fosforilación de segundos mensajeros del receptor de insulina. Los segundos mensajeros se activan por el receptor de insulina; existen dos rutas de activación, la metabólica [fosfatidilinositol 3-quinasa (PI3-quinasa)] y la mitogénica [Proteína quinasa activada por mitógenos (MAPK)]. Las rutas metabólicas promueven el transporte de glucosa, síntesis de glucógeno y glucólisis; las rutas mitogénicas promueven la proliferación celular. La translocación del transportador GLUT4 del plasma a la membrana se requiere para el transporte de glucosa de músculo y grasa (Goodarzi, 2014).

La insulina se requiere para transportar la glucosa fuera de la circulación y para que pueda entrar en el músculo y tejido adiposo. Esta también restringe



la salida de glucosa del hígado e inhibe la lipólisis en tejido adiposo (Goodarzi, 2014).

#### **2.2.4 Fisiopatología de la diabetes**

La Diabetes Mellitus Tipo 2 (DMT2) es la forma más común de diabetes (90%), se origina por la interacción entre predisposición genética y un ambiente y estilo de vida adversos. Una persona con Diabetes Mellitus Tipo 2 (DMT2) no produce suficiente insulina (insuficiencia de insulina) o sus células no son capaces de utilizar la insulina adecuadamente (resistencia a la insulina). La resistencia a la insulina se refiere a la acción deteriorada de la insulina en músculo esquelético, hígado y tejido adiposo. La resistencia a la insulina resulta en una gluconeogénesis y glucogenólisis aumentada, siendo el principal contribuidor a la hiperglicemia en ayuno. La síntesis de glucógeno hepático y muscular también se ve deteriorada. La hiperglicemia posprandial resulta de una absorción de glucosa disminuida junto al deterioro de la supresión de salida de glucosa del hígado después de ingerir alimentos y la captación hepática de glucosa deteriorada. La acumulación de grasa en hígado, músculos y páncreas contribuye a la disfunción de células  $\beta$  y resistencia a la insulina. La inflamación, estrés oxidativo y estrés en el retículo endoplasmático, los niveles de lípidos elevados y acumulación de amiloides también desencadena la disfunción de células  $\beta$ . Además de la resistencia a la insulina, hay una disfunción de células  $\alpha$  que al parecer contribuye a la hiperglicemia posprandial; en la DMT2, los niveles de glucagón no son suprimidos después de la comida. Al comienzo de la enfermedad, los niveles de insulina son muy bajos y son deficientes por culpa de la resistencia a la insulina, es decir, los niveles bajos de insulina no son capaces de lidiar contra la resistencia existente. Muchos individuos con resistencia a la insulina no desarrollan la enfermedad porque su cuerpo compensa esta resistencia con una secreción aumentada de insulina. Solo aquellos a quienes falla esta compensación desarrollan intolerancia a la glucosa y DMT2. Otras vertientes

creen que la disfunción de las células  $\beta$  es el primer déficit, con el desarrollo de resistencia a la insulina secundario a los niveles anormales de insulina. Otra característica de la DMT2 es la insuficiente supresión posprandial de la secreción de glucagón, que resulta en la una alta contribución de los niveles de glucosa hepática. Una vez que hay hiperglicemia durante la DMT2, esta empieza a contribuir a la deterioración de la actividad y secreción de la insulina ocasionando un fenómeno conocido como “toxicidad a la glucosa” (Dendup y col., 2018; Goodarzi, 2014)

Para el tratamiento de DMT2 se deben involucrar cambios en el estilo de vida (actividad física, dieta y pérdida de peso), el diagnóstico temprano junto a estos cambios más un tratamiento con medicamentos con diferentes mecanismos de acción como pueden ser estimulación de la secreción de insulina, reducción de la resistencia a la insulina, inhibición de digestión de carbohidratos, (Dendup y col., 2018; Goodarzi, 2014), los cuales, inhiben enzimas como la  $\alpha$ -amilasa (pancreática) y  $\alpha$ -glucosidasa (intestinal). Estas dos enzimas están involucradas en el rompimiento de almidón en oligosacáridos ( $\alpha$ -amilasa) y la hidrólisis de oligosacáridos ( $\alpha$ -glucosidasa) en el cuerpo, el inhibir estas enzimas puede contribuir a disminuir la hiperglicemia posprandial y hacer más lenta la digestión de carbohidratos en personas con DMT2. Actualmente hay alimentos que han comprobado tener la capacidad de ejercer esta función como son el amaranto y el maíz azul (Chmelík y col., 2019; Conforti y col., 2005; Girija y col., 2011; Huang y col., 2015; Kehinde y col., 2020; Kumar Sri y col., 2010; Neder-Suárez y col., 2021; Nile y col., 2014; Nkobole y col., 2021; Paulina y col., 2017; Smorowska y col., 2021).

### **2.3 Amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*)**

El amaranto (Figura 1) es una planta tropical que aún no se ha explorado del todo. Desde antes de la conquista española, los granos de amaranto han sido un cultivo importante, fue consumido por civilizaciones precolombinas como la Azteca, Inca y Maya en sus regiones de domesticación



**Figura 1.** Granos de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*).

(Clouse y col., 2016; Coelho y col. 2018; Montoya-Rodríguez y col., 2015). El amaranto es principalmente cultivado en México y Sudamérica (Karamac y col., 2019). Hay tres especies principales productoras de granos, las cuales son nativas de América: *Amaranthus hypochondriacus*, nativo de México; *Amaranthus cruentus*, nativo de Guatemala y México; *Amaranthus caudatus*, nativo de Perú (Montoya-Rodríguez y col., 2014). Estos tres tipos de granos forman parte de la familia Amaranthaceae (Clouse y col., 2016; Orona-Tamayo y col., 2016). Los granos de amaranto son distintos a la de los cereales verdaderos. Estas son de color crema a dorado, tienen forma lenticular y un diámetro de 1mm, en un rango de 0.9 a 1.7mm (D'Amico y col., 2017; Iftikhar & Khan, 2019).

La importancia del amaranto ha resurgido en los últimos años, principalmente por su calidad nutricional, en particular, el valor nutricional de las proteínas de sus granos (Clouse y col., 2016; Moronta y col., 2016). Es un cultivo muy versátil y conveniente debido a que se adapta a diferentes tipos de clima, es resistente a estrés por calor y a sequías (Alemayehu y col., 2014). Además, el amaranto ha atraído la atención de los tecnólogos en alimentos para explorar más sobre sus aspectos funcionales debido a la evolución de nuevas técnicas de procesamiento de alimentos (Coelho y col., 2018). Los granos de amaranto son utilizados para elaborar productos ricos y de buen valor nutricional como galletas, panes, confitería, pasteles y pastas. El contenido químico favorable y los resultantes altos valores nutricionales tanto como su gran potencial por el uso práctico reconoce al amaranto como la planta del siglo veintiuno (Iftikhar & Khan, 2019).

### **2.3.1 Composición nutricional**

El amaranto es considerado un grano con una alta calidad nutricional, la cual ya ha sido previamente analizada, se ha establecido su composición única de proteínas y sus altos niveles de minerales que lo posicionan mejor ante otros cereales de uso común (Atukuri y col., 2019). En la **Tabla 1** se mues-

**Tabla 1.** Comparación de las características nutrimentales de los granos de amaranto con otros cereales.

| <b>Composición proximal</b> | <b>Amaranto</b>            | <b>Maíz</b> | <b>Trigo</b> | <b>Sorgo</b> |
|-----------------------------|----------------------------|-------------|--------------|--------------|
|                             | <b>(bs<sup>1</sup>, %)</b> |             |              |              |
| Proteínas                   | 14.5                       | 10          | 13.2         | 12.7         |
| Grasas                      | 10.2                       | 5.2         | 2.7          | 4.0          |
| Cenizas                     | 2.5                        | 1.2         | 1.7          | 1.7          |
| Carbohidratos               | 64.0                       | 74.3        | 70.3         | 73.1         |
| Fibra dietaria              | 8.8                        | 9.3         | 12.1         | 8.5          |

<sup>1</sup>bs: base seca.

Adaptado de Alemayehu y col. (2014).

tran los resultados de la composición nutrimental de amaranto en comparación con otros alimentos. La composición de sus aminoácidos es muy cercana a la recomendada por la FAO/OMS para una dieta saludable. El amaranto tiene un contenido de proteínas mayor al de la mayoría de los cereales (13 a 19%). Las principales proteínas son albúminas y globulinas. Las proteínas del amaranto son ricas en lisina (3.2 a 13.1 g/100 g proteína), el cual es un aminoácido limitante en cereales como el maíz, trigo y arroz. También es rica en aminoácidos azufrados, cisteína y metionina, en los rangos de 2.0 a 3.8 y 0.6 a 2.4 g / 100 g de proteína respectivamente, los cuales son limitantes en legumbres, haciendo ideal el consumo de amaranto para la dieta humana (Alemayehu y col., 2014; Montoya-Rodríguez y col., 2014; Orona-Tamayo y col., 2016). Su contenido de lípidos va de 5 a 13%, especialmente ácidos grasos no saturados como el ácido linoleico (Montoya-Rodríguez y col., 2014). El almidón es el principal componente de los granos de amaranto, este va en un rango de 48 a 69%. También, estos granos son una fuente excelente de fibra insoluble, principalmente lignina y celulosa, la cantidad de fibra en el grano de amaranto es mayor a la de la mayoría de los cereales (Coelho y col., 2018).

Los granos de amaranto y sus productos son ricos en compuestos bioactivos con propiedades diversas, entre los que encontramos flavonoides, ácidos fenólicos, antocianinas, taninos y fitoesteroles. Algunos de los compuestos identificados se han asociado con propiedades promotoras de la salud al poseer capacidad antitrombótica, antioxidante, hipocolesterolémicas, anticancerígenas e hipoglucemiantes (Coelho y col., 2018; Montoya-Rodríguez y col., 2014, 2015; Nkobole y col., 2021).

## **2.4 Maíz (*Zea mays*)**

### **2.4.1 Antecedentes generales**

El maíz es el alimento básico de México, el consumo de maíz de la población mexicana es de los más altos del mundo. El maíz surgió aproximadamente entre los años 8000 y 600 AC en Mesoamérica (México y Guatemala), probablemente a lo largo del acantilado occidental de México Central o del Sur, a 500km de la ahora Ciudad de México. México es considerado el centro primario de la diversidad genética donde el cultivo del maíz ha tenido una rápida evolución (Acosta & Acosta, 2009). El maíz ha sido muy relevante a lo largo de la historia, por ello se considera un producto cultural dentro de México, además de ser una mercancía presente en el plano económico que a lo largo de los años ha tenido un impacto a nivel mundial en la alimentación humana (Peregrina y col., 2018).

### **2.4.2 Producción de maíz**

De acuerdo con datos de FAOSTAT, en 2020 se produjeron 1,162,352,997 toneladas de maíz a nivel mundial. Durante 2020 en México la producción de maíz fue de aproximadamente 21,885,170 toneladas, siendo cultivado en más de 7,481,137 hectáreas en todos los estados del país. Particularmente, durante 2020 en el estado de Sinaloa se sembraron 574,915 hectáreas con una producción de 6,262,779 toneladas, siendo el estado con mayor producción de maíz de la república mexicana (SIAP, 2022).

### **2.4.3 Maíces pigmentados**

En México se siembran diversas variedades de maíz (*Zea mays* L.), siendo conocido como el centro de origen y contando con la más grande diversidad de recursos genéticos del mundo. Aproximadamente 59 razas de maíces y variedades locales se han clasificado basándose en las características morfológicas y en las frecuencias de isozimas. De estas variedades locales de maíz mexicano, se siembran los fenotipos pigmentados

violetas, negros, azules, rojos y amarillos, siendo estos los más comunes (Bello-Pérez y col., 2015; Uriarte-Aceves y col., 2015).

Los genotipos criollos de maíz son cultivados en diferentes regiones de México, en la región del noroeste, más específicamente, en el estado de Sinaloa, se han identificado 13 variedades locales de maíz, del cual destaca la variedad Elotero de Sinaloa como una de las más distintivas (Uriarte-Aceves y col., 2015) (Figura 2).

Los colores del maíz pigmentado se atribuyen a fitoquímicos dietarios como las antocianinas, que se encuentran alojadas en el pericarpio y la capa aleurona. Estos pigmentos son solubles en agua y además de brindar color, tienen actividad biológica demostrada, que se ha asociado con muchos beneficios a la salud como la prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer, control de la obesidad, diabetes y en el mejoramiento de las funciones visuales y cerebrales, entre otros desordenes (Bello-Pérez y col., 2015; Sánchez-Madrigal y col., 2015).

### **2.5 Productos y formas de consumo (amaranto y maíz)**

El maíz es un alimento versátil que puede ser utilizado para distintas preparaciones. En general, se utiliza para consumo animal, sin embargo, para consumo humano se pueden generar diversos tipos de productos como harina de maíz, sémola, maicena, tortillas, snacks y cereales para el desayuno (Rouf Shah y col., 2016). Por otro lado, en los últimos años el amaranto ha llamado la atención de los tecnólogos en alimentos, se han visto mayores publicaciones que exploran los aspectos funcionales de este grano y se ha podido evolucionar debido a las nuevas técnicas de caracterización (Coelho y col., 2018). Los granos de amaranto se pueden utilizar para producir distintos tipos de productos aptos para el consumo humano, entre ellos panes, pasteles, hot cakes, galletas, crepas, tallarines, alegrías (amaranto tostado) y pasta (Iftikhar & Khan, 2019).





**Figura 2.** Granos de maíz azul (*Zea Mays*) raza Elotero de Sinaloa.

El empleo de calor durante el procesamiento de los alimentos tiene efectos sobre la biodisponibilidad y digestibilidad de carbohidratos, proteínas y aminoácidos además de brindar cambios en el perfil de las sustancias activas (Iftikhar & Khan, 2019).

## **2.6 Extrusión**

La extrusión es una tecnología de procesamiento de alimentos en la cual el material alimenticio humedecido, almidonado y proteínico se mueve continuamente a través de un barril que encierra uno o un conjunto de tornillos donde el calor calienta el material convirtiéndolo en una masa semisólida plastificada reestructurada, para al final hacerla pasar a través de una abertura con forma (matriz) bajo la combinación de diversas condiciones como humedad, presión, calor y cizallamiento en poco tiempo, que ocasiona cambios en las propiedades fisicoquímicas, funcionales y nutricionales (Bordoloi y col., 2014; Choton y col., 2020; Dey y col., 2021). Este procesamiento se ha utilizado ampliamente en la industria alimenticia para manufacturar alimentos expandidos, no expandidos y texturizados (Arora y col., 2020).

El proceso de extrusión fue desarrollado en los años 1870s y posee una distinta variedad de aplicaciones que ha ido avanzando, ensanchando y crecido a lo largo del tiempo. Desde los años 1930s, el extrusor de un solo tornillo se ha utilizado para mezclar sémola de trigo y agua para hacer productos de pasta, lo que posteriormente, progresó a la manufactura de productos instantáneos y productos tipo snacks (Arora y col., 2020; Choton y col., 2020). Actualmente, la extrusión se ha vuelto un proceso muy versátil que nos permite crear productos “personalizados” mediante el uso de diversas materias primas y modificando las variables del proceso (Arora y col., 2020; Dey y col., 2021). A esto se le conoce como “Funcionalización” la cual se define como el proceso de transformación fisicoquímica o alteración conformacional de los componentes alimenticios para alcanzar atributos deseables en la

matriz alimentaria. Estas transformaciones pueden suceder a través de cambios conformacionales en proteínas, degradación de almidón, dextrinización y/o formación de péptidos, modificaciones químicas, caramelización, formación y rompimiento de puentes disulfuro, formación de isopéptidos, otras reacciones de polimerización, degradación y reacciones de reticulación (Arora y col., 2020). El proceso de extrusión es una de las tecnologías más utilizadas en la industria de la pasta para la obtención de pastas sin gluten (con ingredientes no convencionales) debido a su rapidez y bajo costo (Palavecino y col., 2020).

### **2.6.1 Parámetros del proceso de extrusión**

La extrusión se explica como un sistema de múltiples entradas y salidas (MIMO) en el que los parámetros se dividen en parámetros de procesamiento de extrusión (entrada), parámetros del sistema de extrusión (dependiente) y parámetros del producto (salida). Los parámetros de entrada (parámetros independientes) de extrusión incluyen la humedad del alimento, la velocidad de alimentación, la velocidad del tornillo, la temperatura y las dimensiones de la matriz, y los parámetros del sistema (parámetros del proceso) incluyen la contrapresión, el par y la energía mecánica específica (SME). El índice de expansión, las propiedades de solubilidad y la densidad de los extruidos se consideran parámetros de salida (propiedades del producto) (Dey y col., 2021; Eka y col., 2020). La velocidad del tornillo es responsable de la tasa de desarrollo de cizallamiento y del tiempo medio de residencia de la alimentación. De este parámetro depende la disipación de la energía mecánica de la harina, la cual influye directamente en la viscosidad de la misma. La temperatura del barril tiene un efecto positivo en el grado de gelatinización del almidón y la expansión del extrudido, mientras que puede afectar negativamente en el color y la humedad del extrudido final (Navale y col., 2015).

La modificación de estos parámetros puede ocasionar efectos positivos y negativos en la calidad nutricional de los alimentos utilizados bajo diferentes condiciones del extrusor, lo que provee a este proceso de flexibilidad en su uso y la necesidad de estudiar más a fondo su efecto en los alimentos (Dey y col., 2021; Singh y col., 2007). Entre los efectos beneficiosos podemos incluir la gelatinización del almidón, destrucción de efectos antinutricionales, incremento de la fibra dietaria total, reducción de la oxidación de lípidos y contaminación de microorganismos además de retener los colores naturales y el sabor de los alimentos (Bordoloi y col., 2014; Choton y col., 2020; Navale y col., 2015).

## **2.7 Pasta**

La pasta es una comida tradicional italiana que es normalmente elaborada de sémola de trigo, la cual, gracias a la migración europea, se ha vuelto muy popular alrededor del mundo y es consumida por muchas culturas. La pasta cocinada tiene una red compacta compleja a través de la cual las enzimas digestivas actúan más lentamente que en otras matrices. También es un transportador de compuestos bioactivos que permiten mejorar las propiedades sensoriales y nutricionales. En los últimos años, existe un interés mundial por la producción y disponibilidad de productos de conveniencia que sean nutritivos (Palavecino y col., 2020), se ha incrementado el consumo y desarrollo de alimentos funcionales debido a las expectativas de los consumidores, quienes exigen productos alimenticios con un aporte nutricional mayor y que su consumo aporte cuidados a la salud. En la población, las pastas alimenticias pueden cumplir con esa demanda debido a que tienen mucha aceptabilidad ya que son de bajo costo, fáciles de preparar, tienen atributos sensoriales adecuados y tienen una larga vida de anaquel (Goñi y col., 2003.; Palavecino y col., 2020; Ramírez-Torres y col., 2017; Tudorică y col., 2002).

La producción de pasta consiste de algunos simples pasos: mezclado, formación y secado (para productos secos). Durante el mezclado se busca que los ingredientes secos alcancen un 30% del contenido de agua y que, a su vez, logren homogenizar el producto. Luego, se busca darle forma a través de diversos métodos, uno puede ser el cocinado por extrusión. En este punto los ingredientes se transforman química y físicamente para luego ser secados para extender su vida de anaquel, manteniendo sus características nutricionales y tecnológicas (Palavecino y col.,2020). El reemplazamiento de gluten en las pastas basadas en cereales es uno de los mayores retos tecnológicos. Para poder cumplir con los requisitos tecnofuncionales que una pasta debe tener hay dos enfoques: elegir los ingredientes junto con los aditivos correctos para alcanzar la estructura deseada o jugar con las condiciones de procesado que promuevan la organización de los componentes de la pasta, lo que se conoce como optimización tecnológica (Marti y col., 2010). Las pastas desarrolladas pueden ser utilizadas para la prevención de enfermedades crónicas debido a la presencia de compuestos con potencial actividad biológica, como actividad hipoglucemiante, mediante la modificación de parámetros de extrusión y selección de materia prima, la cual puede ser de componentes no tradicionales (Arora y col.,2020).

## **2.8 Actividad hipoglucemiante en alimentos**

Mejorar los hábitos de alimentación con la introducción de alimentos que contienen compuestos bioactivos puede ser una estrategia efectiva de prevención primaria para lograr la disminución de las muertes ocasionadas por una enfermedad (Paulina y col., 2017). Existen alimentos cuyos extractos, compuestos, péptidos, etc., pueden mostrar una actividad hipoglucemiante por medio de diferentes mecanismos de acción. Un mecanismo investigado es la inhibición de enzimas digestivas. Las enzimas comúnmente estudiadas son la  $\alpha$ -glucosidasa y  $\alpha$ -amilasa. La  $\alpha$ -glucosidasa es una enzima que se ubica en el borde del cepillo intestinal cuya función es hidrolizar los enlaces 1,4- $\alpha$ -

glucosídicos presentes en oligosacáridos para convertirlos en monosacáridos absorbibles en el intestino en el torrente sanguíneo. Si inhibimos esta enzima se puede retardar la digestión de carbohidratos reduciendo la absorción general de glucosa y así logrando prevenir la hiperglicemia (Kehinde y col., 2020). Mientras que la  $\alpha$ -amilasa es una endoenzima digestiva categorizada como miembro de la familia de las glicosil hidrolasa con la función básica de catalizar la descomposición hidrolítica de polisacáridos como el glucógeno, almidón (enlaces  $\alpha$ -1,4-glicosídicos) y polisacáridos similares en productos de pesos moleculares más bajos como maltosa, glucosa, maltriosa, etc. La inhibición de  $\alpha$ -amilasa bloquea la hidrólisis de enlaces glucosídicos en carbohidratos digeribles, disminuye la absorción de la glucosa en el tracto gastrointestinal y reduce los picos de glucosa posprandial (Chmelík y col., 2019; Kehinde y col., 2020).

El uso de los alimentos como agentes hipoglucemiantes pueden ser una alternativa a las desventajas que tiene el uso de medicamentos inhibidores de  $\alpha$ -glucosidasa y  $\alpha$ -amilasa normalmente utilizados y sus efectos secundarios como es la incomodidad abdominal, flatulencias y posibles diarreas (Nkobile y col., 2021).

### **2.8.1 Antecedentes de actividad hipoglucemiante en amaranto**

Se han realizado estudios en diferentes especies del género *Amaranthus*, los cuales se han centrado en la evaluación de la actividad hipoglucemiante mediante el mecanismo de inhibición de enzimas digestivas (Nkobile y col., 2021). En un estudio de extractos de dos variedades de *Amaranthus cruentus* (Oscar blanco y Víctor rojo) mostraron una apreciable actividad antioxidante y una actividad hipoglucemiante mediante la inhibición de  $\alpha$ -amilasa, logrando reducir los picos de glucosa plasmática en pacientes con diabetes (Conforti y col., 2005; Mahmood, 2016). Otro estudio con extractos metanólicos de *Amaranthus caudatus* demostraron actividad hipoglucemiante en ratas inducidas con diabetes, atribuido a la actividad

antioxidante de los flavonoides contenidos en el extracto que ejercen una función protectora en las células- $\beta$  del páncreas (Girija y col., 2011). Ashok Kumar y col., (2012) realizaron una investigación de la actividad hipoglucemiante de los extractos metanólicos de *Amaranthus viridis* en ratas con diabetes inducida, los resultados mostraron una inhibición significativa ( $p < 0.05$ ) de  $\alpha$ -amilasa, siendo prometedores para la prevención de diabetes (Ashok Kumar y col., 2012). Mientras que el estudio más reciente revisado, demostró que extractos y compuestos de *Amaranthus cruentus* y *Amaranthus hybridus* poseen una alta actividad inhibitoria de  $\alpha$ -glucosidasa alta y una actividad inhibitoria de  $\alpha$ -amilasa media, demostrando que estos extractos y compuestos pueden disminuir la absorción de glucosa (Nkobile y col., 2021).

### **2.8.2 Antecedentes de actividad hipoglucemiante en maíz azul**

Al igual que el amaranto, el maíz azul ha demostrado poseer compuestos con actividad hipoglucemiante con capacidad de inhibir enzimas como la  $\alpha$ -amilasa y  $\alpha$ -glucosidasa, las cuales al inhibirse son clave para la disminución de la hiperglicemia postprandial (Smorowska y col., 2021). El maíz ha atraído la atención por ser rico en compuestos bioactivos como las antocianinas, polifenoles, flavonoles, ácidos hidroxicinámicos, ácido dihidroxibenzoico, ferúlico y clorogénico, flavonas, isoflavonas y flavonoides, compuestos a los que se les ha asociado a la protección celular contra el daño oxidativo y otros beneficios potenciales como la actividad hipoglucemiante, la cual ocurre mediante diferentes mecanismos como el incremento de la secreción de insulina en páncreas, el mejoramiento de la resistencia a la insulina y cambios en la expresión de algunos genes involucrados en el metabolismo de carbohidratos y lípidos. (Huang y col., 2015; Neder-Suárez y col., 2021). Zhang y col., (2019) realizaron un estudio sobre la composición de fenólicos de 20 genotipos de maíz púrpura a los cuales se les evaluaron las actividades antiinflamatorias, antiadipogénicas e hipoglucemiantes. Sus resultados mostraron que los extractos de antocianinas de los 20 genotipos de

maíz púrpura poseían actividad hipoglucemiante mediante la inhibición *in vitro* de enzimas que son blanco terapéutico como la  $\alpha$ -amilasa y la dipéptidil peptidasa (DPP-IV) 4, además de que esta actividad llegaba a ser incluso mejor que la reportada por otros alimentos como los frutos de higo, la soya y algunas plantas nativas brasileñas. De igual manera Nile y Park, (2014) pusieron a prueba los fenólicos del maíz para determinar su capacidad inhibitoria de  $\alpha$ -glucosidasa. Los datos de sus estudios sugieren que el maíz junto a sus compuestos aislados podrían ser una buena fuente de agentes antioxidantes e inhibidores de  $\alpha$ -glucosidasa. Los resultados mostraron que los compuestos aislados de maíz obtuvieron mejores valores que el estándar de acarbose, indicando que estos podrían ser utilizados como fuertes inhibidores de  $\alpha$ -glucosidasa. Estos estudios demuestran la importancia y el peso que los compuestos fenólicos pueden tener en los fenotipos de maíz pigmentados (Zhang y col., 2019) además de que estos ingredientes pueden ser usados para la producción de diversos productos a través de la tecnología de extrusión como podrían ser las pastas (Neder-Suárez y col., 2021).



### **3. HIPÓTESIS**

La simulación gástrica *in vitro* de pasta alimenticia a base de amaranto y maíz azul presenta actividad antioxidante e hipoglucemiante en sus hidrolizados

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

El objetivo de esta investigación fue caracterizar las propiedades tecnofuncionales, nutricionales, nutracéuticas e hipoglucemiantes de una pasta alimenticia a base de amaranto/maíz azul.

### 4.2 Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general se llevaron a cabo los siguientes objetivos específicos:

1. Obtener una pasta de amaranto/maíz azul y una pasta de amaranto/maíz azul adicionada con sémola de trigo.
2. Caracterizar las propiedades tecnofuncionales de ambas pastas (PAAMAO y POS).
3. Caracterizar nutricionalmente ambas pastas (PAAMAO y POS).
4. Caracterizar las propiedades nutracéuticas de una pasta alimenticia elaborada a base de amaranto y maíz azul y de la pasta alimenticia a base de amaranto/maíz azul adicionada con sémola de trigo.
5. Evaluar la potencial actividad hipoglucemiante *in vitro* de los hidrolizados obtenidos mediante simulación de digestión, de una pasta alimenticia elaborada a base de amaranto y maíz azul y de la pasta alimenticia a base de amaranto/maíz azul adicionada con sémola de trigo.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Materiales

Se utilizó maíz azul y amaranto para elaborar una pasta alimenticia extrudida a base de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*) y maíz azul (*Zea mays*) raza elotero de Sinaloa.

### 5.2 Elaboración de la pasta

La harina de amaranto/maíz azul extrudida se obtuvo mediante la metodología reportada por Montoya-Rodríguez y col. 2014, con algunas modificaciones. Los granos de amaranto (lote de 500g) y los granos de maíz azul raza elotero de Sinaloa (lote de 500g) se molieron y se acondicionaron con agua purificada para alcanzar un contenido de humedad de 26% y se le agregó monoglicérido al 1.5%. Cada lote se empaquetó en bolsas de polietileno y fueron almacenados a 4°C por 8h. Antes de la extrusión, las harinas se atemperaron a 25°C por 4h. Se utilizó un extrusor de laboratorio modelo 20 DN (CW Brabender Instruments, Inc., NJ, USA) con un diámetro de tornillo de 19 mm; longitud hasta diámetro 20:1; relación de compresión nominal 2:1; y una apertura de dado de 3 mm. Se utilizaron las condiciones óptimas de extrusión para una pasta de amaranto/maíz azul, las cuales han sido previamente establecidas en el laboratorio, con una temperatura de extrusión de 82°C y contenido de humedad de 26%; la velocidad de tornillo fue de 50rpm. Para el mejoramiento de las propiedades tecnofuncionales de la pasta, se le adicionó un 10% de sémola de trigo y se aumentó el contenido de monoglicérido a 1.7% siguiendo las mismas condiciones de extrusión, resultando en una segunda pasta con 45% de amaranto, 45% de maíz azul y 10% de sémola de trigo.

### 5.3 Propiedades tecnofuncionales

#### 5.3.1 Calidad de cocción de la pasta (tiempo óptimo de cocción y pérdida de sólidos por cocción)

La calidad de cocción de la pasta se determinó por los métodos internacionales aprobados por la (AACC, 1995) 66-50.01 (2000). Las muestras de pasta se cocinaron en agua destilada hirviendo. El tiempo óptimo de cocción (TOC) se alcanzó cuando el centro blanco, en el núcleo central de la pasta cocida, desaparece después de comprimirlo entre dos piezas de vidrio a intervalos de 30 s.

La pérdida de sólidos por cocción (PSPC), se determinó por los métodos AACC 66-50.01 (2000). Los resultados se obtuvieron mediante la cocción de 100g de pasta en 100 mL de agua destilada por el tiempo óptimo de cocción. Una vez cocida la pasta esta se coló y se recolectó el agua de la cocción para luego ser llevada a sequedad obteniendo solamente los sólidos que en ella se contenían. Los resultados se expresaron en gramos de pérdida de materia / 100 g de pasta cruda. Los resultados se calcularon siguiendo la siguiente ecuación:

$$PSPC = \left( \frac{\text{Peso de pasta cocida (g)}}{\text{Peso de sólidos perdidos en pasta (g)}} \right) \times 100$$

#### 5.3.2 Diferencia total de color ( $\Delta E$ )

La medición del color de las muestras se realizó de acuerdo a la metodología reportada por Milán-Noris y col., (2019), con un colorímetro Minolta Chroma-meter mod CR-210 (Konica Minolta Co., Osaka, Japón). Para la evaluación del color, se utilizaron aproximadamente 100g de muestra, la cual se colocó en una caja Petri de 15cm de diámetro y se determinaron los valores de color  $L^*$  (luminosidad),  $a^*$  (rojo-verde) y  $b^*$  (amarillo-azul). Estos valores fueron usados para calcular la diferencia total de color usando la siguiente ecuación:

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2}$$

Donde:

$\Delta E$  = Diferencia total de color

$\Delta L$ ,  $\Delta a$  y  $\Delta b$  = Diferencias absolutas de los valores de L, a y b del estándar utilizado y los valores correspondientes observados de la muestra.

### **5.3.3 Índice de absorción de agua e índice de solubilidad en agua**

El índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) se determinaron por la metodología de Milán-Noris y col., 2019. Se colocaron 2.5g de harina con 30mL de agua en un tubo de centrifuga y se mezclaron a mano. Los tubos se llevaron a un baño maría a 70°C por 30 minutos, para luego ser centrifugados a 3000g por 10 minutos. Los sobrenadantes se decantaron en un vaso de cristal previamente pesado para determinar los sólidos, después los vasos se pusieron a secar en una estufa a 105°C durante toda la noche. El IAA e ISA se calcularon de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\text{IAA (gg}^{-1}\text{)} = \text{Peso del sedimento} / \text{Peso de la muestra}$$

$$\text{ISA} = (\text{Peso del sobrenadante} / \text{Peso de la muestra}) \times 100$$

### **5.3.4 pH**

El pH de las harinas se determinó de acuerdo con el método 02-52, (método 02-52, AOAC, 1999). A 10g de muestra se agregaron 100mL de agua desionizada hervida y fría; la suspensión se agitó en un agitador orbital por 10 min a 240 rpm, después se midió el pH de la suspensión. Las mediciones se realizaron por triplicado. Se utilizaron buffers de calibración de pH 4, 7 y 10.

## **5.4 Propiedades nutricionales**

### **5.4.1 Proteínas**

Se utilizó el método 46.12 micro-Kjeldahl de la AOAC (1999) para la determinación de nitrógeno en un sistema Kjelttec (Mod 1009 y 1002, Tecator, Suecia). Este método se basa en el pasaje del N orgánico a ion  $\text{NH}_4^+$  mediante una digestión de la muestra en caliente en medio sulfúrico concentrado. El ion  $\text{NH}_4^+$  es neutralizado y el  $\text{NH}_3$  liberado se destila y cuantifica mediante una titulación. El N cuantificado se convierte a contenido de proteínas por medio de un factor. Se digirieron 0.2g de muestra con 5mL de ácido sulfúrico y mezcla reactiva de selenio (Merck Co., Alemania) a una temperatura de 200°C. En la destilación de la muestra previamente diluida con 10mL de agua, se emplearon disoluciones de NaOH al 40% y ácido bórico al 4% como indicador para recibir el destilado. La titulación se llevó a cabo con una disolución valorada de HCl 0.1 N. Posteriormente la proteína cruda se calculó por multiplicación del contenido de nitrógeno total por el factor 6.25.

### **5.4.2 Lípidos**

Se determinaron de acuerdo al método 920.39 de la AOAC (1999). Las extracciones se realizaron en muestras de 3 – 4g de harina que fueron pasados a través de malla 80 (0.180mm). Se utilizó un equipo Soxhlet; el disolvente empleado fue éter de petróleo. La prueba se realizó por triplicado.

### **5.4.3 Cenizas**

La determinación de cenizas se realizó de acuerdo al método 934.01 de AOAC (1999). Se llevó a cabo la combustión de la materia orgánica en una mufla a 550°C hasta obtener una ceniza gris luminosa o a peso constante. El contenido de cenizas se pesó después de ser enfriadas en un desecador y alcanzar la temperatura ambiente. Se llevó a cabo por triplicado.

### **5.4.4 Carbohidratos**

Se calcularon por diferencia.

#### 5.4.5 Digestibilidad proteínica *in vitro*

La digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) se determinó de acuerdo al procedimiento reportado por Tinus y col., (2012) basado en el de Hsu y col., (1977). Se pesó el equivalente a 62.5mg de proteína de la harina y se rehidrató en 10mL de agua destilada a 37°C durante 1 h con agitación constante (85rpm), después de lo cual el pH se ajustó a 8.0 con NaOH/HCl 0.1M. Se prepararon al momento del análisis, 10mL de una solución multienzimática que consistieron en 16mg de tripsina (T-0303 Tripsina del páncreas porcino) Tipo IX-S 15,600unidades/mg solido-16,200mg proteína), 31mg de quimotripsina ( $\alpha$ -Quimiotripsina de páncreas bovino C4129 tipo II 54unidades/mg solido-60unidades/mg de proteína) y 13mg de proteasa (Proteasa P5147 de *Streptomyces griseus* Tipo XIV, P3.5unidades/mg de sólidos). El pH de la solución multienzimática se ajustó a 8.0 y se mantuvo a 37°C hasta el momento del análisis. Después de la rehidratación, se añadió 1mL de la solución multienzimática a la dispersión de la muestra tomando la lectura de pH inicial y final después de 10 minutos en agitación (85rpm). El cambio en el pH a los 10min de la digestión ( $\Delta$ pH10min) se utilizó para calcular el porcentaje de digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) de las muestras con la siguiente fórmula:

$$\%DPIV = 65.66 + 18.10 (\Delta\text{pH}10\text{min})$$

#### 5.4.6 Perfil de aminoácidos

Se hidrolizaron muestras de harinas de frijol ayocote crudo, cocido, extrudido y proteína con un contenido de proteína de 2 mg en HCl 6 N (4 ml) a 110 °C durante 24 h en tubos sellados bajo nitrógeno. El triptófano se analizó mediante HPLC después de hidrólisis básica según Yust et al., (2004). Los aminoácidos se determinaron después de la derivatización con etoximetilenmalonato de dietilo mediante HPLC según el método de Alaiz et al., (1992), utilizando ácido D,L- $\alpha$ -aminobutírico como estándar interno y un

tubo de 300 mm X 3,9 mm d.i. columna de fase inversa (Novapack C18, 4  $\mu$ m; Waters, Milford, MA, EE. UU.).

#### **5.4.7 Relación de eficiencia proteica calculada (C-PER), puntuación de aminoácidos corregida por digestibilidad de proteínas (PDCAAS).**

Las C-PER se calculó según el procedimiento sugerido por Satterlee y col., (1982) y reportado como método 982.30 por la (AOAC, 1999) (1999). Para el cálculo se requiere conocer la digestibilidad proteínica *in vitro* y el contenido de aminoácidos esenciales de la muestra analizada. Se empleó caseína como proteína de referencia. El C-PER se determinó utilizando la ecuación de regresión que se obtuvo a partir del perfil de aminoácidos y la digestibilidad proteínica *in vitro* de la muestra y de la proteína de referencia, así como en la relación a los valores estándares de FAO/OMS (1991) para aminoácidos esenciales. La determinación de la puntuación de aminoácidos corregida por digestibilidad de proteínas (PDCAAS) se realizó siguiendo la metodología de Culetu y col., 2021 PDCAAS se obtiene multiplicando el valor más bajo de aminoácidos por el porcentaje de digestibilidad proteínica *in vitro* de la muestra.

### **5.5 Propiedades nutraceuticas**

#### **5.5.1 Extracción de fitoquímicos libres**

Para obtener los extractos de compuestos fenólicos libres se siguió el método descrito por Dewanto et al., (2002) modificado ligeramente en nuestro laboratorio. Primeramente, 0.5g de harina se mezclaron con 1mL de una solución de etanol en agua al 80%(v/v) y se agitaron en un agitador orbital durante 10 min. Después se centrifugaron a 2500xg por 10 min, se recolectó el sobrenadante y posteriormente se evaporó hasta la sequedad a 45°C. El extracto obtenido se congeló a -80°C y fue almacenado hasta su utilización. Los extractos de compuestos fenólicos libres se reconstituyeron con 200 $\mu$ L de



etanol al 80%, mientras que los extractos de compuestos fenólicos ligados se reconstituyeron con 200µL de metanol al 50%.

### **5.5.2 Extracción de fitoquímicos ligados**

Los compuestos ligados en las harinas de amaranto/maíz azul, pasta alimenticia extrudida de amaranto y maíz azul optimizada y pasta comercial, fueron extraídos de acuerdo con el método reportado por Adom y col., (2005) y Adom & Liu, 2002 con ligeras modificaciones. El residuo obtenido durante la extracción de compuestos fenólicos libres se digirió con 1mL de NaOH 2M en baño maría a 95 °C durante 30 min. La mezcla fue agitada por 1 hora a temperatura ambiente y a continuación neutralizada con 0.2mL de HCl concentrado. La solución final se extrajo cuatro veces con 0.5mL de acetato de etilo en cada extracción. El acetato de etilo se evaporó a 35 °C y los compuestos ligados se reconstituyeron y solubilizaron con 2mL de metanol en agua (50:50) para obtener una solución clara y homogénea.

### **5.5.3 Digestión gastrointestinal simulada *in vitro***

La digestión simulada *in vitro* de las proteínas de harina de una pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada se realizó siguiendo la metodología propuesta por Megías y col., (2004) con algunas modificaciones. Primeramente, la harina de amaranto se suspendió en agua, en una relación 1:20 p/v; y se llevó a cabo una digestión enzimática con pepsina [EC 3.4.23.1, 662 unidades/mg; enzima/substrato, 1:20 (w/w); pH 2.0]. La hidrólisis se detuvo incrementando el pH a 7.5 para iniciar una subsecuente hidrólisis con pancreatina [4x USP; enzima/substrato, 1:20 (w/w); pH 7.5] durante 3 horas. La hidrólisis se detuvo bajando el pH a 4.0 y calentando las muestras a 75 °C durante 20 min y los hidrolizados obtenidos se centrifugaron a 20,000g durante 20 min a 4 °C. Ambas hidrólisis se realizaron a 37 °C durante 3 horas. Posterior a esto se eliminaron las sales de los hidrolizados mediante ultra filtración y una vez eliminadas las sales, los hidrolizados se liofilizaron en una liofilizadora

Labconco (Kansas, MO Freeze Dryer 4.5.) y fueron almacenados en congelación hasta su uso.

#### **5.5.4 Extracción de compuestos metanólicos en digeridos de pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada**

Se realizó una extracción siguiendo el método reportado por Milán-Noris y col., 2019. Para ello, se pesaron 50mg de digeridos de una pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada con 1mL de metanol al 80%, posteriormente fueron sometidos a sonicación durante 15 minutos para luego ser centrifugados a 3000rpm durante 10 minutos a 4°C. Posteriormente, se recolectó el sobrenadante y al precipitado se le repitió la extracción; se mezclaron los sobrenadantes para ser llevados a sequedad a una temperatura de 45°C; finalmente el residuo obtenido fue reconstituido con 1mL de metanol al 80% para ser utilizado.

#### **5.5.5 Actividad antioxidante (AAOx)**

La capacidad antioxidante se determinó utilizando el método de capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC) reportado por Mora-Rochin y col., (2010) y Ou y col., (2002).

ORAC mide la inhibición antioxidante de la cadena radical peróxilo rompiendo la actividad antioxidante por la transferencia de un átomo de H. El ensayo se basa en el grado de inhibición de oxidación de la fluorosceína (FL) por los antioxidantes que recogen los radicales peróxilo, generados de la degradación térmica de 2,2'-azobis (2-metil-propionamida) dihidroclorido (AAPH). Una solución stock de FL (1.2mM) se preparó pesando 39.87mg de FL, disolviéndolo en 100mL de buffer de fosfatos (PBS) (75mM, pH 7.4), el cual se almacenó en completa oscuridad bajo condiciones refrigerantes hasta su uso. De la solución stock, una segunda solución se preparó por dilución (10µM). La solución de trabajo (0.1µM) se preparó diariamente de la dilución de 0.25mL de la segunda solución en 25mL de PBS. El radical AAPH (200mM) se preparó diariamente tomando 207mg de AAPH y llevándolos a 5mL con

PBS. El estándar de referencia que se utilizó fue de 1mM de solución de trolox que fue preparada en PBS de una solución stock estándar de 5mM que se almacenó en refrigeración a -20°C. Alícuotas de 25µL de los extractos de las muestras de compuestos fenólicos libres y ligados de las harinas se diluyeron en PBS 75nM (pH 7.4) y se colocaron en placas de 96 pocillos, en un soporte de placas de un lector de microplacas (Synergy™ HT Multi-Detection, BioTek, Inc., Winooski, VT), donde 150µL de FL (0.1µM) se dispensaron, mezclaron e incubaron a 37°C durante 30min antes de añadir 25µL de AAPH. La reacción se llevó a cabo a 37°C y la fluorescencia (485nm para excitación y 538nm para emisión) se midió en intervalos de 2 min durante 60min. El cálculo de los efectos protectores de las muestras y el control fue de las áreas integradas netas bajo las curvas decauyentes de fluorescencia (AUC)  $[AUC_{\text{Muestra}} - AUC_{\text{control}}]$ . Los resultados obtenidos se expresaron como micromoles equivalentes de Trolox por cada 100g en base seca (bs) de la muestra.

#### **5.5.6 Compuestos fenólicos**

La cuantificación de compuestos fenólicos totales se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Singleton y col., (1999). En una microplaca se depositaron 20µL de cada extracto de fitoquímicos, posteriormente se oxidaron con 180µL del reactivo Folin-Ciocalteu. Luego se les adicionó 50µL de carbonato de sodio al 7% y se dejó en incubación por 90 minutos. Pasado el tiempo de incubación, se midió la absorbancia a 750nm utilizando un lector de microplacas (Synergy™ HT Multidetecction, Biotek, Inc., Winooski, VT). Se preparó una curva de calibración utilizando ácido gálico como estándar y el contenido de fenólicos totales se reportó como miligramos equivalentes de ácido gálico (mg EAG) por 100g de muestra, en base seca. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

#### **5.5.7 Flavonoides**

La determinación de flavonoides se realizó siguiendo la metodología reportada por Liu y col., (2007). En una microplaca de 96 pocillos se añadieron

20µL de extracto puro con 100µL de agua destilada, posteriormente se adicionaron 6µL de nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ ) al 5% y se dejó reposar por 6 minutos. A continuación, se agregaron 12µL de cloruro de aluminio ( $\text{AlCl}_3$ ) al 10% y se dejó reposar por 5 minutos para añadir 40 µL de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 1M y 22µL de agua destilada, se puso a reposar 30 minutos. Pasado el tiempo, se leyó la absorbancia en un lector de microplacas a 510nm. Se preparó una curva estándar de catequina. Los resultados fueron expresados como mg equivalentes de catequina por cada 100g de muestra.

## **5.6 Potencial biológico**

### **5.6.1 Extracción total de proteínas de las harinas sin digerir**

La extracción se realizó siguiendo las metodologías reportadas por Montoya-Rodríguez y col., (2014) con algunas modificaciones. El extracto de proteína se preparó utilizando una solución de buffer fosfato salino (PBS) a un pH de 7.4, en una relación de 50mg de harina en 1 mL de buffer. Una vez que se agregó el buffer a la harina, esta se agitó en un vórtex para homogeneizar la muestra. Antes de iniciar la extracción se preparó un baño ultrasónico a 40°C en el cual se procedió a realizar la extracción de proteínas colocando las muestras en el baño ultrasónico durante 70 minutos a 40°C, mezclando cada 10 minutos con un vórtex. Finalmente, la mezcla se centrifugó a 13000g durante 20 minutos a 4°C, se colectaron los sobrenadantes que finalmente se iban a utilizar. Todas las fracciones se obtuvieron por triplicado.

### **5.6.2 Medición de proteína soluble (DC- Protein Assay)**

La proteína soluble fue determinada siguiendo el método para microplacas descrito en el kit DC-Protein Assay (Bio-Rad Laboratories, Hercules, CA). Es un ensayo colorimétrico para determinar la concentración de proteína. La cantidad de proteína soluble fue calculada utilizando una curva estándar de albúmina de suero bovino. La preparación de la curva estándar fue preparada con 15 mg de albúmina de suero bovino disueltos en 10mL de PBS (1500 µg/mL), la cual posteriormente se diluyó hasta los 10 µg/mL. La

curva estándar se preparó el mismo día de la medición y se preparó con el mismo PBS utilizado en la muestra. Una vez realizada la curva estándar y diluciones se cargaron en una microplaca transparente limpia y seca: 5  $\mu$ L de cada punto de la curva estándar y 5  $\mu$ L de muestra. Posteriormente se agregaron 25  $\mu$ L de reactivo A (solución de tartrato de cobre alcalino) y 200  $\mu$ L de reactivo B (reactivo folin diluido) (Bio-Rad 500-0116). Después de agregar los reactivos, se dejó en reposo durante 15 minutos para posteriormente medir la absorbancia en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 690 nm.

Esta reacción se basa en la interacción de los aminoácidos aromáticos con los reactivos A y B. Altos niveles de aminoácidos aromáticos nos indican un mayor contenido de proteína soluble. El color de la muestra cambia de claro a azul, un color azul más intenso indica mayor contenido de proteína soluble.

### **5.6.3 SDS-PAGE**

Las muestras se diluyeron en buffer Laemmli (Bio-Rad Laboratories) con 5%- $\beta$ -mercaptoetanol para posteriormente ponerse en ebullición durante 5 minutos previos a cargarlas en el gel de separación.

El ensayo se llevó a cabo a temperatura ambiente por el método Laemmli (1970). Los extractos de proteína de la pasta de amaranto y maíz azul se analizaron mediante SDS-PAGE utilizando geles Mini PROTEAN® TAGXTM (Bio-Rad). Se utilizó el estándar de peso molecular de proteínas Prestrained SDS-PAGE Standards, broad range (Bio-Rad). La electroforesis se llevó a cabo a 110 Voltios durante 120 minutos en una solución fijadora de 10 % de Buffer Tris Glicina y 90 % de agua. Después los geles se removieron y se les agregó una solución de azul de Coomassie R250 (Coomassie brilliant blue R250 1.25 g, agua desionizada 200 mL, metanol 250 mL, ácido acético glacial 50 mL) durante toda la noche para teñir las bandas, posteriormente se lavaron con una solución para desteñir (agua destilada 670 mL, metanol 290 mL, ácido acético glacial 40 mL y ácido tricloroacético 35 g) durante 2 h y la

imagen se obtuvo utilizando el sistema de imagen Gel Doc™ XR+ Gel Documentation System de Bio-Rad.

#### **5.6.4 Actividad hipoglucemiante**

##### **5.6.4.1 Actividad inhibitoria de $\alpha$ -amilasa**

La actividad inhibitoria de  $\alpha$ -amilasa se determinó utilizando una solución de  $\alpha$ -amilasa en una concentración de 2U/mL (en 0.1M buffer de fosfato de sodio pH 6.9). Se prepararon las muestras, primero se mezclaron 50 $\mu$ L de extracto con 100 $\mu$ L de enzima, se incubó a 37°C por 5 minutos en agitación. Posteriormente se agregó 100 $\mu$ L de almidón y 100 $\mu$ L de una solución de tartrato potásico sódico. Por último, se añadieron 800 $\mu$ L de buffer de fosfatos. La solución obtenida se utilizó para el ensayo; se utilizaron 200 $\mu$ L de la solución en una microplaca de 96 pocillos y se midió la absorbancia a 540nm. Los datos fueron reportados como porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -amilasa (%IAA). Se utilizó un control de color para cada muestra y una curva de acarbosa como control. Los resultados se expresan como  $\mu$ g equivalentes de acarbosa (EA) por 100 gramos de muestra ( $\mu$ g EA/100g).

##### **5.6.4.2 Actividad inhibitoria de $\alpha$ -glucosidasa**

Para determinar el porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa se utilizó la metodología de López-Angulo y col., 2014 con modificaciones. Para ello, se utilizaron 50 $\mu$ L de extractos metanólicos como control positivo, en una placa de 96 pocillos se les agregará 100 $\mu$ L de 0.5U/ml de una solución enzimática de  $\alpha$ -glucosidasa (en 0.1M buffer de fosfato de sodio pH 6.9) y se incubó por 10 minutos. Se agregaron alícuotas de 50 de solución 5mM de "*p-nitrofenil- $\alpha$ -D D-glucopiranosido*" (en 0.1M buffer de fosfato de sodio pH 6.9) a la muestra y se incubó por 5 minutos a 25°C. Se utilizaron muestras sin sustrato como correctores de color. La absorbancia se leyó a 405nm. Los resultados se presentaron como porcentaje de inhibición relativo al control positivo teniendo 100% de inhibición.

## **5.7 Análisis estadístico**

Los resultados se reportaron como la media de los valores obtenidos en los ensayos realizados y se calcularon las desviaciones estándar. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar si existían diferencias estadísticas significativas entre las muestras analizadas. La comparación de medias se realizó con el programa GraphPad Prism 9 utilizando la prueba de Tukey y serán consideradas estadísticamente diferentes a un valor  $p < 0.05$ . Todos los análisis fueron hechos en al menos tres réplicas independientes.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Obtención de pastas mediante extrusión.

En la **Figura 3** se muestra una pasta obtenida mediante extrusión.

### 6.2 Características de calidad de cocción de la pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAMAAO), pasta optimizada con sémola (POS) y una pasta comercial integral de trigo (PCIT).

Los resultados de las evaluaciones de las características de calidad de cocción de la PAAMAO, POS y PCIT se muestran en la **Tabla 2**, las cuales incluyen el tiempo óptimo de cocción (TOC) y la pérdida de sólidos por cocción (PSPC). El mayor valor de TOC fue de 14 minutos en PAAMAO y POS, mientras que el menor fue de 11.50 minutos PCIT, con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ). De igual manera, los resultados de PSPC mostraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ), la PAAMAO obtuvo el mayor valor con 24.10% y la PCIT el menor con 9.80%. En la PSPC se mostró una diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) entre las tres muestras evaluadas, con una disminución de PSPC debido a la adición de sémola a la formulación.

### 6.3 Propiedades tecnofuncionales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).

En la **Tabla 3** se muestran los resultados de las propiedades tecnofuncionales, las cuales engloban al índice de absorción de agua (IAA), índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de aceite (IAAc), pH y diferencia total de color ( $\Delta E$ ). El IAA mostró un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) en la HAMA después de la extrusión para el caso de la PAAMAO. El mayor valor de IAA lo obtuvo la PCIT 5.04 y el menor valor lo obtuvo la HAMA 3.26 g gel/muestra.





**Figura 3.** Pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO).

**Tabla 2.** Características de calidad de cocción de la pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAMAAO), pasta optimizada con sémola (POS) y una pasta comercial integral de trigo (PCIT)<sup>1</sup>.

| <b>Propiedad tecnofuncional</b>    | <b>PAAMAO<sup>2</sup></b> | <b>POS<sup>3</sup></b>  | <b>PCIT<sup>4</sup></b> |
|------------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tiempo óptimo de cocción (mm:ss)   | 14±0.50 <sup>a</sup>      | 14±0.50 <sup>a</sup>    | 11.50±0.50 <sup>b</sup> |
| Pérdida de sólidos por cocción (%) | 24.10±0.40 <sup>a</sup>   | 19.06±1.50 <sup>b</sup> | 9.80±0.03 <sup>c</sup>  |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). <sup>2</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>3</sup>POS: pasta optimizada con sémola. <sup>4</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo.

**Tabla 3.** Propiedades tecnofuncionales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT)<sup>1</sup>.

| Propiedad tecnofuncional | HAMA <sup>2</sup>       | PAAMAO <sup>3</sup>     | POS <sup>4</sup>        | PCIT <sup>5</sup>       |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| IAA <sup>6</sup>         | 3.26±0.02 <sup>c</sup>  | 3.76±0.07 <sup>b</sup>  | 3.58±0.08 <sup>b</sup>  | 5.04±0.01 <sup>a</sup>  |
| ISA <sup>7</sup>         | 10.67±0.46 <sup>d</sup> | 14.40±0.40 <sup>c</sup> | 16.50±1.05 <sup>b</sup> | 22.40±0.40 <sup>a</sup> |
| IAAc <sup>8</sup>        | 0.12±0.00 <sup>a</sup>  | 0.13±0.00 <sup>a</sup>  | 0.14±0.01 <sup>a</sup>  | 0.12±0.00 <sup>a</sup>  |
| pH                       | 6.57±0.01 <sup>a</sup>  | 6.58±0.01 <sup>a</sup>  | 6.57±0.07 <sup>a</sup>  | 6.51±0.00 <sup>a</sup>  |
| <i>Hunter L</i>          | 72.05±0.50 <sup>a</sup> | 31.98±0.80 <sup>c</sup> | 62.60±0.60 <sup>b</sup> | 63.25±1.21 <sup>b</sup> |
| a                        | 2.97±0.06 <sup>b</sup>  | 1.61±0.05 <sup>d</sup>  | 2.55±0.10 <sup>c</sup>  | 3.47±0.27 <sup>a</sup>  |
| b                        | 6.65±0.12 <sup>c</sup>  | 5.98±0.23 <sup>d</sup>  | 11.28±0.20 <sup>b</sup> | 16.28±0.20 <sup>a</sup> |
| Diferencia de color ΔE   | 24.99±0.50 <sup>c</sup> | 64.60±0.79 <sup>a</sup> | 35.18±0.57 <sup>b</sup> | 14.38±0.60 <sup>d</sup> |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes (p<0.05). <sup>2</sup>HAMA: harina de amaranto y maíz azul. <sup>3</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>4</sup>POS: Pasta optimizada con sémola de trigo. <sup>5</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo. <sup>6</sup>IAA: índice de absorción de agua expresado en (g gel/g muestra). <sup>7</sup>ISA: índice de solubilidad en agua expresado en g de sólidos/100g de muestra seca. <sup>8</sup>IAAc: índice de absorción de aceite expresado como mL de aceite absorbido/g de ms.

Los valores obtenidos para PAAMAO (3.76 g/gel muestra) y POS (3.58 g/gel muestra), fueron significativamente mayores ( $p < 0.05$ ) a los obtenidos por HAMA (3.26 g/gel muestra), indicando que la extrusión ocasionó un incremento del 15.33 y 9.81% para PAAMAO y POS, respectivamente. El ISA mostró un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) en sus valores a consecuencia de la extrusión. El mayor valor de ISA fue de 22.4 y el menor de 10.67 g sólidos/100g de muestra seca para la PCIT y HAMA, respectivamente. El incremento en el ISA de la HAMA cruda después de su extrusión fue de 3.67g sólidos/100g de muestra seca para el caso de PAAMAO (34.95%) y de 5.83g sólidos/100g de muestra seca para POS (54.63%). Los resultados obtenidos para el análisis de color mostraron diferencias en los distintos valores analizados. Los valores *Hunter* L se encontraron en un rango de 31.98 para PAAMAO a 72.05 para HAMA. Existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) de HAMA respecto a PAAMAO. La adición de sémola a la formulación también modificó el comportamiento de dicho valor, POS obtuvo un valor de 62.60, que fue estadísticamente significativo mayor ( $p < 0.05$ ) que PAAMAO y sin diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) a la PCIT, que obtuvo un valor de 63.25. Los valores *a* se mostraron en un rango de 1.61 a 3.47, el mayor valor fue obtenido por PCIT, mientras que el menor fue obtenido por PAAMAO. Se encontraron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) entre todas las muestras analizadas. La extrusión ocasionó una disminución de este valor para ambas pastas procesadas. De igual manera, los valores *b* también mostraron diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) entre todas las muestras analizadas. Los valores *b* se encontraron en un rango de 16.28 a 5.98, obtenidas por PCIT y PAAMAO, respectivamente. La extrusión ocasionó diferentes cambios en los valores *b*, PAAMAO mostró una disminución significativa ( $p < 0.05$ ), mientras que POS mostró un aumento significativo ( $p < 0.05$ ). La diferencia de color mostró resultados entre 14.38 y 64.60, el menor y mayor valor corresponden a PCIT y PAAMAO, respectivamente. Se encontraron valores con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) para todas

las muestras. La extrusión ocasionó un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) en el valor  $\Delta E$  para PAAMAO y POS, con valores de 64.60 y 35.18, respectivamente.

#### **6.4 Composición proximal de amaranto, maíz azul, harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta optimizada con sémola (POS). DPIV de harinas y pastas.**

La composición proximal de amaranto, maíz azul, PAAMAO y POS se muestran en la **Tabla 4**, se incluyen los resultados de contenido de proteína, lípidos, cenizas y carbohidratos. No hay diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) entre el contenido de proteína de la HAMA, PAAMAO y POS. El mayor valor de proteína fue obtenido por el amaranto y el menor por el maíz azul con valores de 13.63% y 8.94%, respectivamente. Para el porcentaje de grasas se obtuvieron los valores mayores para amaranto y PAAMAO con valores de 7.86% y 7.98%, respectivamente, mientras que el valor menor lo obtuvo el maíz azul con 5.02%. Se encontró diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) en el porcentaje de grasas entre la HAMA (6.7%) con PAAMAO (7.98%) y POS (7.43%). Los valores de cenizas no mostraron diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) después de la extrusión para el caso de PAAMAO, sin embargo, se encontró diferencia estadística significativa de HAMA respecto a POS ( $p < 0.05$ ). Los valores de cenizas de HAMA (3.07%), PAAMAO (2.83%) y POS (2.54%) se encontraron en medio de los obtenidos para amaranto (3.5%) y maíz azul (1.44%) con diferencia estadística significativa ante ambas muestras ( $p < 0.05$ ). Finalmente, los resultados de carbohidratos mostraron diferencia estadística significativa entre todas las muestras ( $p < 0.05$ ) respecto a las muestras extrudidas (PAAMAO y POS), el mayor valor lo obtuvo el maíz azul y el menor el amaranto con valores de 88.44 y 75.02%. En la **Tabla 5** se muestran los resultados de DPIV. Se encontró un

**Tabla 4.** Composición proximal de amaranto, maíz azul, harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT)<sup>1</sup>.

| Composición proximal | Amaranto                | Maíz azul               | HAMA <sup>3</sup> (50/50) | PAAMAO <sup>4</sup>     | POS <sup>5</sup>        |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                      | (bs <sup>2</sup> , %)   |                         |                           |                         |                         |
| Proteínas            | 13.63±0.82 <sup>a</sup> | 8.94±0.18 <sup>c</sup>  | 11.26±0.43 <sup>b</sup>   | 11.52±0.58 <sup>b</sup> | 11.09±0.61 <sup>b</sup> |
| Grasas               | 7.86±0.24 <sup>a</sup>  | 5.02±0.48 <sup>c</sup>  | 6.82±0.44 <sup>b</sup>    | 7.98±0.05 <sup>a</sup>  | 7.43±0.18 <sup>ab</sup> |
| Cenizas              | 3.50±0.10 <sup>a</sup>  | 1.44±0.02 <sup>d</sup>  | 3.07±0.29 <sup>b</sup>    | 2.83±0.09 <sup>bc</sup> | 2.54±0.14 <sup>c</sup>  |
| Carbohidratos        | 75.02±0.49 <sup>d</sup> | 84.44±0.30 <sup>a</sup> | 79.98±0.58 <sup>b</sup>   | 78.68±0.31 <sup>c</sup> | 78.76±0.32 <sup>c</sup> |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). <sup>2</sup>bs: base seca. <sup>3</sup>HAMA: harina amaranto y maíz azul. <sup>4</sup>PAAMAO: Pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>5</sup>POS: Pasta optimizada con sémola de trigo.

**Tabla 5.** Efecto de la extrusión sobre el porcentaje de digestión proteínica *in vitro* (DPIV)<sup>1</sup>.

| <b>Muestra evaluada</b> | <b>DPIV<sup>2</sup></b><br><b>(%)</b> |
|-------------------------|---------------------------------------|
| HAMA <sup>3</sup>       | 71.09±0.51 <sup>b</sup>               |
| PAAMAO <sup>4</sup>     | 77.06±0.25 <sup>a</sup>               |
| POS <sup>5</sup>        | 76.61±0.64 <sup>a</sup>               |
| PCIT <sup>6</sup>       | 75.62±0.25 <sup>a</sup>               |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). <sup>2</sup>DPIV: digestibilidad proteínica *in vitro*. <sup>3</sup>HAMA: harina de amaranto y maíz azul. <sup>4</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>5</sup>POS: pasta optimizada con sémola. <sup>6</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo.

aumento de la DPIV de las muestras después de la extrusión (HAMA respecto a PAAMAO y POS). Por otro lado, no se observó diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) en la adición de sémola a la formulación (PAAMAO respecto a POS), lo que indica que dicha adición no perjudica la digestibilidad *in vitro* de las proteínas. Los resultados de aminoácidos esenciales para HAMA y POS se muestran en la **Tabla 6.**, se pueden notar diferencias en aminoácidos azufrados (metionina y cisteína), HAMA obtuvo un valor de 2.62 y POS uno de 3.31g/100g proteína. No se observaron cambios en la calificación química y en los aminoácidos limitantes de las muestras analizadas (HAMA y POS). Los valores de C-PER<sup>1-3</sup>, PDCAAS y pBV mostraron valores mayores para POS que HAMA.

**6.5 Efecto de la extrusión en la capacidad antioxidante total evaluada mediante método de capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC), en harina de amaranto y maíz azul (HAMA), en una pasta de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS), una pasta comercial integral de trigo (PCIT) y digestión de POS (fracción *in* y *out*).**

Los resultados obtenidos para la capacidad antioxidante libre, ligada y total evaluada mediante método de capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC) para HAMA, PAAMAO, POS y PCIT se muestran en la **Tabla 7.** Los resultados se muestran como  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$ . La capacidad antioxidante de la fracción libre mostró valores entre 3,169 y 11,704  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$ , obtenidos por la POS y HAMA, respectivamente. La extrusión ocasionó una disminución significativa ( $p < 0.05$ ) en la capacidad antioxidante de la fracción libre para el caso de PAAMAO y POS. La adición de sémola en la pasta optimizada hizo disminuir su capacidad antioxidante, observándose diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) entre PAAMAO y POS en la actividad antioxidante de la fracción libre, con valores de 5,751 y 3,169  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$ , respectivamente. PAAMAO demostró tener valores mayores



**Tabla 6.** Calificación química, aminoácidos limitantes, PDCAAS, C-PER, pBV y contenido de aminoácidos esenciales en harina de amaranto y maíz azul (HAMA) y pasta optimizada con sémola (POS)<sup>1</sup>.

|                                       | HAMA <sup>2</sup> | POS <sup>3</sup> | FAO <sup>4</sup> |
|---------------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| AAE <sup>5</sup>                      |                   |                  |                  |
| Calificación química (%)              | 70.95             | 70.95            |                  |
| AA <sup>6</sup> limitantes            | Trp               | Trp              |                  |
| PDCAAS <sup>7</sup>                   | 0.50              | 0.53             |                  |
| C-PER <sup>81</sup>                   | 2.94              | 3.05             |                  |
| C-PER <sup>82</sup>                   | 3.27              | 3.31             |                  |
| C-PER <sup>83</sup>                   | 3.13              | 3.77             |                  |
| pBV <sup>9</sup>                      | 33.94             | 40.55            |                  |
| AAE <sup>5</sup><br>(g/100g proteína) |                   |                  |                  |
| His                                   | 2.65              | 2.65             | 1.9              |
| Ile                                   | 3.87              | 3.87             | 2.8              |
| Leu                                   | 9.00              | 9.00             | 6.6              |
| Lys                                   | 4.26              | 4.26             | 5.8              |
| Met+Cys                               | 2.62              | 3.31             | 2.5              |
| Phe+Tyr                               | 5.24              | 5.24             | 6.3              |
| Thr                                   | 3.79              | 3.79             | 3.4              |
| Trp                                   | 0.78              | 0.78             | 1.1              |
| Val                                   | 4.99              | 4.99             | 3.5              |
| Total                                 | 37.25             | 37.93            | 33.9             |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias de tres mediciones. <sup>2</sup>HAMA: Harina de amaranto y maíz azul. <sup>3</sup>POS: pasta optimizada con sémola. <sup>4</sup>FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <sup>5</sup>AAE: aminoacid score. <sup>6</sup>AA: aminoácidos. <sup>7</sup>PDCAAS: puntuación de aminoácidos corregida por digestibilidad de proteínas. <sup>8</sup>C-PER: Relación de eficiencia de proteína calculada. <sup>9</sup>pBV: valor biológico predicho.

**Tabla 7.** Efecto de la extrusión en la capacidad antioxidante total evaluada mediante método ORAC en una pasta de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta optimizada con sémola (POS)<sup>1</sup>.

| Capacidad antioxidante | HAMA <sup>3</sup>                        | PAAMAO <sup>4</sup>       | POS <sup>5</sup>          | PCIT <sup>6</sup>        |
|------------------------|--|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                        | (μmoles eq Trolox/100g bs <sup>2</sup> ) |                           |                           |                          |
| Libres                 | 11704±469.20 <sup>a</sup>                | 5751±403.90 <sup>b</sup>  | 3169±73.85 <sup>c</sup>   | 5910±449.70 <sup>b</sup> |
| Ligados                | 7141±306.20 <sup>c</sup>                 | 8713±458.00 <sup>b</sup>  | 9483±396.90 <sup>a</sup>  | 3709±116.00 <sup>d</sup> |
| Totales                | 18844±573.30 <sup>a</sup>                | 14464±572.20 <sup>b</sup> | 12652±454.60 <sup>c</sup> | 9618±558.00 <sup>d</sup> |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes (p<0.05).

<sup>2</sup>micromoles equivalentes de trolox/100g, base seca <sup>3</sup>HAMA: harina de amaranto y maíz azul. <sup>4</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>5</sup>POS: Pasta optimizada con sémola. <sup>6</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo.

( $p < 0.05$ ) de capacidad antioxidante de la fracción libre en comparación con PCIT, mientras que POS mostró valores menores con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) en la misma fracción, respecto a HAMA y PAAMAO. El menor valor de actividad antioxidante de la fracción ligada fue de 3,709  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$ , obtenido por la PCIT, mientras que el mayor valor de actividad antioxidante en la fracción ligada fue de 9,483  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$  por parte de la POS. Todas las muestras obtuvieron valores con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) para la actividad antioxidante de la fracción ligada. La extrusión ocasionó un aumento en la actividad antioxidante de ambas pastas optimizadas con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ). Las dos pastas obtenidas (PAAMAO y POS) mostraron mayores valores ( $p < 0.05$ ) de actividad antioxidante en la fracción ligada en comparación con la PCIT. En cuanto a la actividad antioxidante total, se encontró que HAMA obtuvo el mayor valor con 18,844, mientras que la PCIT obtuvo el menor valor con 9618. La extrusión ocasionó una disminución significativa ( $p < 0.05$ ) en la capacidad antioxidante total de las pastas obtenidas (PAAMAO y POS). PAAMAO obtuvo un valor mayor ( $p < 0.05$ ) en la actividad antioxidante total con 14,464  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$  en comparación a POS que obtuvo valores de 12,652  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$ . Ambas pastas (PAAMAO y POS) obtuvieron mayores valores ( $p < 0.05$ ) que POS (9,618  $\mu\text{mol eq trolox}/100\text{g bs}$ ).

#### **6.6 Efecto de la extrusión sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).**

En la **Tabla 8** se muestra las concentraciones de compuestos fenólicos totales en HAMA, PAAMAO, POS y PCIT. Los valores del contenido de fenólicos de PAAMAO y POS disminuyeron significativamente ( $p < 0.05$ ) después del proceso de extrusión para las fracciones libre, ligada y CFT.

**Tabla 8.** Efecto de la extrusión sobre el contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT)<sup>1</sup>.

|   | HAMA <sup>3</sup>          | PAAMAO <sup>4</sup>      | POS <sup>5</sup>         | PCIT <sup>6</sup>        |
|---|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Contenido de fenólicos<sup>2</sup></b> | mg eq de ácido gálico/100g |                          |                          |                          |
| Libres                                    | 66.74±3.73 <sup>c</sup>    | 93.68±3.65 <sup>a</sup>  | 62.73±1.25 <sup>c</sup>  | 75.16±2.36 <sup>b</sup>  |
| Ligados                                   | 259.7±2.20 <sup>b</sup>    | 199.90±6.09 <sup>c</sup> | 224.9±2.31 <sup>a</sup>  | 176.40±7.89 <sup>d</sup> |
| Totales                                   | 326.40±5.94 <sup>a</sup>   | 293.60±9.55 <sup>b</sup> | 287.60±3.39 <sup>b</sup> | 251.50±6.32 <sup>c</sup> |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes (p<0.05). <sup>2</sup>Expresado como miligramos equivalentes de ácido gálico/100g, <sup>3</sup>HAMA: harina de amaranto y maíz azul. <sup>4</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>5</sup>POS: Pasta optimizada con sémola. <sup>6</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo.

PAAMAO fue la pasta que obtuvo el mayor contenido ( $p < 0.05$ ) de fenólicos libres con 93.68mg EAG/100g, mientras que HAMA y POS obtuvieron los menores valores ( $p < 0.05$ ) con 66.74 y 62.73mg EAG/100g, respectivamente. En el caso de los fenólicos ligados, la muestra que obtuvo el mayor valor ( $p < 0.05$ ) fue la POS con 224.9mg EAG/100g, mientras que la PAAMAO obtuvo el menor valor ( $p < 0.05$ ) con 199.90mg EAG/100g. Por último, los resultados del contenido del CFT mostraron que la HAMA obtuvo el mayor valor ( $p < 0.05$ ) con 326.40 mg EAG/100g y la PCIT obtuvo el menor valor con 251.50mg EAG/100g. Después del proceso de extrusión se lograron observar retenciones del 89.95 y 88.11% del CFT para PAAMAO y POS, respectivamente.

### **6.7 Efecto de la extrusión en el contenido de flavonoides totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT)**

En la **Tabla 9** se muestran los resultados obtenidos en la determinación de flavonoides de la fracción libre, ligada y total. El contenido de flavonoides totales se encontró en un rango de 6.20 a 9.05 mg equivalentes de catequina por cada 100 gramos (mg EC/100g) obtenidos por PCIT y HAMA, respectivamente. La HAMA obtuvo el mayor valor ( $p < 0.05$ ) de flavonoides totales con 9.05mg EC/100g, mientras que PCIT obtuvo el menor valor ( $p < 0.05$ ) con 6.20mg EC/100g. POS obtuvo el mayor contenido ( $p < 0.05$ ) de flavonoides ligados (6.65mg EC/100g) con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) sobre las demás muestras evaluadas. POS y PCIT no mostraron diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ) en el contenido de flavonoides totales. Los valores mayores de fenólicos para la fracción libre fueron obtenidos por HAMA con 4.22 mg eq catequina/100g, mientras que los menores fueron obtenidos por POS con 0.55 mg eq catequina/100g y PCIT con 0.87 mg eq catequina/100g. La extrusión de HAMA ocasionó una disminu-

**Tabla 9.** Efecto de la extrusión en el contenido de flavonoides totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT)<sup>1</sup>.

|   | HAMA <sup>3</sup>              | PAAMAO <sup>4</sup>    | POS <sup>5</sup>        | PCIT <sup>6</sup>      |
|---|--------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Contenido de flavonoides<sup>2</sup></b> | <b>mg eq de catequina/100g</b> |                        |                         |                        |
| Libres                                      | 4.22±0.36 <sup>a</sup>         | 1.94±0.32 <sup>b</sup> | 0.55±0.09 <sup>c</sup>  | 0.87±0.12 <sup>c</sup> |
| Ligados                                     | 4.83±0.16 <sup>b</sup>         | 5.71±0.19 <sup>b</sup> | 6.65±0.53 <sup>a</sup>  | 5.33±0.32 <sup>b</sup> |
| Totales                                     | 9.05±0.51 <sup>a</sup>         | 7.66±0.49 <sup>b</sup> | 7.20±0.51 <sup>bc</sup> | 6.20±0.43 <sup>c</sup> |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes (p<0.05). <sup>2</sup>miligramos equivalentes de catequina/100g base seca. <sup>3</sup>HAMA: harina de amaranto y maíz azul. <sup>4</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>5</sup>POS: Pasta optimizada con sémola. <sup>6</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo.

ción significativa ( $p < 0.05$ ) para las pastas obtenidas (PAAMAO y POS). PAAMAO mostró un mayor valor ( $p < 0.05$ ) del contenido de flavonoides en la fracción libre a comparación de POS y PCIT, con 1.94 mg eq catequina/100g frente a 0.55 y 0.87 mg eq catequina/100g para POS y PCIT, respectivamente. Para la fracción ligada, POS (6.65) obtuvo el mayor valor ( $p < 0.05$ ) frente a PAAMAO (5.71 mg eq catequina/100g), PCIT (5.33 mg eq catequina/100g) y HAMA (4.83 mg eq catequina/100g). No se encontró diferencia estadística significativa en el contenido de flavonoides de la fracción ligada entre PAAMAO, PCIT y HAMA.

### **6.8 Efecto de la extrusión y digestión *in vitro* sobre el contenido de proteína soluble (PS) .**

En la **Tabla 10** se presentan los valores de PS de HAMA, PAAMAO, POS, PCIT, así como proteína soluble y capacidad antioxidante de digeridos de POS (fracción disponible en el colon *in* y fracción basolateral *out*). El contenido de PS de la HAMA disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) después del proceso de extrusión y el de la POS disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) después de la digestión simulada *in vitro*. El valor máximo de PS fue de 4.83 mg PS/mL para HAMA, un 40.99% mayor, con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ), que el obtenido por la POS, la cual obtuvo un contenido de PS de 2.85 mg PS/mL. La digestión de POS disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) el contenido de PS obteniendo el valor de 3.41 mg PS/mL para la fracción *In* y 0.53 mgPS/mL para la fracción *Out*. Los resultados de la capacidad antioxidante total por método ORAC de los digeridos en las fracciones *in* y *out* de la POS se muestran en la **Tabla 10**. Los valores se encontraron en un rango de 4.6 a 5,856  $\mu\text{mol}$  eq trolox/100g bs, el mayor valor fue obtenido por la fracción *in*, mientras que el menor fue obtenido por la fracción *out* con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 10.** Efecto de la extrusión y digestión *in vitro* sobre el contenido de proteína soluble (PS) y capacidad antioxidante ORAC<sup>1</sup>.

| Muestra evaluada    | PS <sup>2</sup>               | Capacidad antioxidante         |
|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|                     | (mg PS/mL)                    | ( $\mu$ mol eq trolox/100g bs) |
| HAMA <sup>3</sup>   | 4.83 $\pm$ 0.42 <sup>a</sup>  |                                |
| PAAMAO <sup>4</sup> | 2.85 $\pm$ 0.11 <sup>bc</sup> |                                |
| POS                 | 2.65 $\pm$ 0.23 <sup>c</sup>  |                                |
|                     | <i>In</i>                     | 5853 $\pm$ 146.80 <sup>a</sup> |
|                     | <i>Out</i>                    | 4.6 $\pm$ 0.41 <sup>b</sup>    |
| PCIT <sup>5</sup>   | 1.98 $\pm$ 0.42 <sup>d</sup>  |                                |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias $\pm$ DE de tres mediciones; letras diferentes por columna, son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). <sup>2</sup>PS: proteína soluble. <sup>3</sup>HAMA: harina de amaranto y maíz azul. <sup>4</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>5</sup>POS: pasta optimizada con sémola. <sup>6</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo.



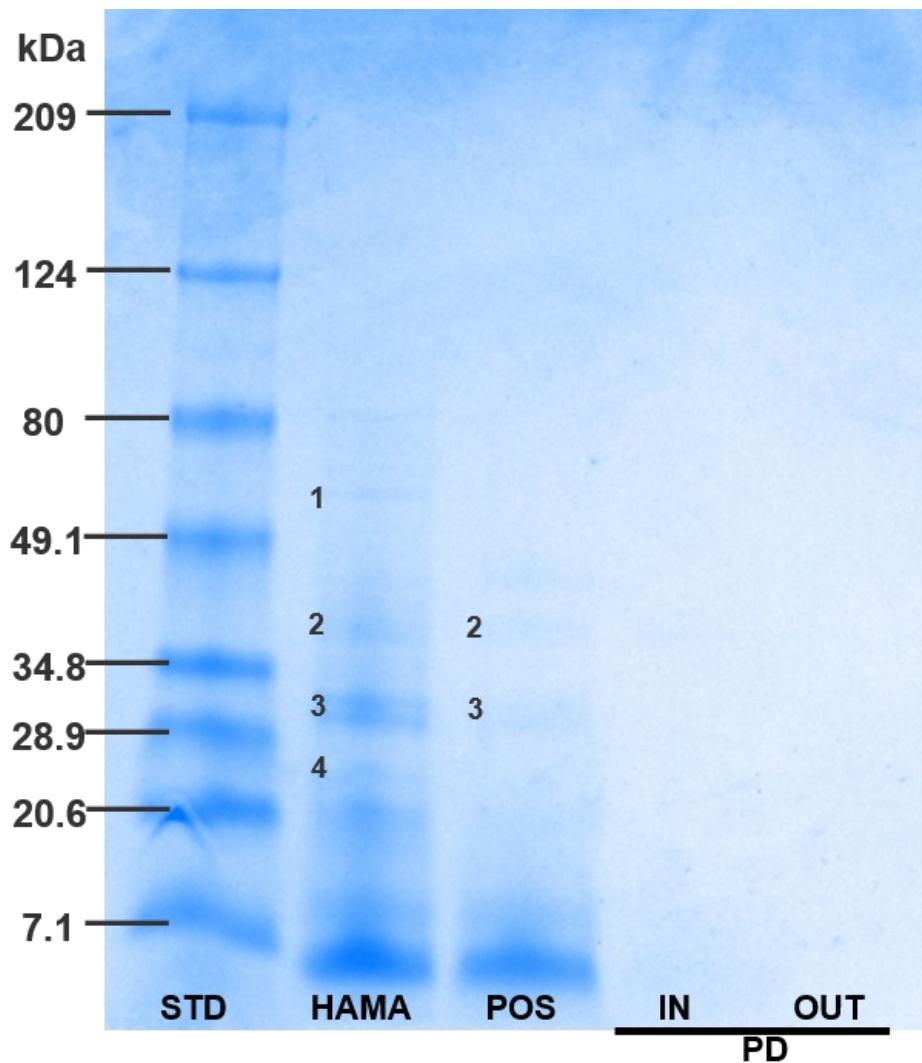
## 6.9 Perfil de proteínas por SDS-PAGE

En la **Figura 4** se presenta el perfil electroforético de proteínas de harina de amaranto 50% y maíz azul 50% (HAMA), pasta optimizada con sémola (POS), digeridos *in* (fracción disponible en el colon) y *out* (fracción basolateral) de la pasta optimizada. Se notaron diferencias en los perfiles de proteína de la HAMA, POS y digeridos. Como se puede observar la HAMA presentó bandas de proteínas entre 7.1 y 80 kDa, la POS mostró entre 7.1 y 34.8 kDa y la pasta digerida mostró una desaparición de las bandas. Las bandas identificadas corresponden a la globulina 11S, albúmina de amaranto, albúmina, glutelinas de maíz, prosistema de amaranto y  $\alpha$ -zeína de maíz azul. En el gel se puede notar una progresiva desaparición de las bandas conforme la harina se sometía a extrusión y a una posterior digestión.

## 6.10 Actividad hipoglucemiante

### 6.10.1 Actividad hipoglucemiante de $\alpha$ -amilasa

En la **Tabla 11** se muestran los resultados de la actividad hipoglucemiante de porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -amilasa de las muestras HAMA, PAAMAO, PCIT y digeridos de POS (fracción disponible en el colon *in* y fracción basolateral *out*). Los resultados del porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -amilasa mostraron valores en un rango de 8.28 a 41.11%. Los mayores valores fueron obtenidos por las pastas de amaranto y maíz azul (PAAMAO y POS) con valores de 41.11 y 41.31% de inhibición de  $\alpha$ -amilasa, respectivamente. Mientras que los menores valores fueron obtenidos por la HAMA y PCIT, con porcentajes de inhibición de  $\alpha$ -amilasa de 10.04 y 8.28%, respectivamente. Se encontró diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ) entre las pastas extrudidas de amaranto y maíz azul respecto a la HAMA y PCIT, mostrando mayor porcentaje ( $p < 0.05$ ) de inhibición de  $\alpha$ -amilasa para PAAMAO y para POS. La digestión de la POS mostró una disminución del % de inhibición de  $\alpha$ -amilasa con diferencia estadística significativa ( $p < 0.05$ ). La fracción disponible en el colon *in* y soluble *Out* demostraron diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre sí con



**Figura 4.** Perfil de proteínas (SDS-PAGE) de harinas de mezcla amaranto maíz azul, pasta alimenticia de amaranto maíz azul optimizada, digeridos *in* (fracción disponible en el colon) y *out* (fracción basolateral) de la pasta optimizada. STD: Estándar de peso molecular de proteínas. HAMA: harina de amaranto y maíz azul. PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. POS: pasta optimizada con sémola. PD: pasta digerida. IN: fracción disponible en el colon. OUT: fracción basolateral.

**Tabla 11.** Actividad hipoglucemiante de harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola de trigo (POS), pasta comercial integral de trigo (PCIT) y digeridos de POS (fracción disponible en el colon *in* y fracción basolateral *out*)<sup>1</sup>.

| <b>Muestra</b>    | <b>HAMA<sup>2</sup></b> | <b>PAAMAO<sup>3</sup></b> | <b>POS<sup>4</sup></b>  | <b>PCIT<sup>5</sup></b> | <b><i>In</i><sup>6</sup></b> | <b><i>Out</i><sup>7</sup></b> |
|-------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| %IAA <sup>8</sup> | 10.04±0.29 <sup>d</sup> | 41.11±3.12 <sup>a</sup>   | 41.31±1.05 <sup>a</sup> | 8.28±0.29 <sup>d</sup>  | 16.66±1.02 <sup>c</sup>      | 22.51±1.68 <sup>b</sup>       |
| %IAG <sup>9</sup> | 45.72±0.64 <sup>b</sup> | 63.57±0.64 <sup>a</sup>   | 42.94±1.40 <sup>b</sup> | 26.58±0.85 <sup>c</sup> | 6.28±2.44 <sup>d</sup>       | 40.44±8.33 <sup>b</sup>       |

<sup>1</sup>Los valores corresponden a las medias±DE de tres mediciones; letras diferentes por fila, son estadísticamente diferentes (p<0.05). <sup>2</sup>HAMA: harina de amaranto y maíz azul. <sup>3</sup>PAAMAO: pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada. <sup>4</sup>POS: pasta optimizada con sémola. <sup>5</sup>PCIT: pasta comercial integral de trigo. <sup>6</sup>*In*: digerido de POS fracción disponible en el colon. <sup>7</sup>*Out*: Digerido de POS fracción basolateral. <sup>8</sup>%IAA: porcentaje de inhibición de α-amilasa. <sup>9</sup>%IAG: porcentaje de inhibición de α-glucosidasa.

con valores de 16.66 y 22.51%, respectivamente.

### **6.11.2 Actividad hipoglucemiante de $\alpha$ -glucosidasa**

En la **Tabla 11** Se muestran los resultados de la actividad hipoglucemiante de porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa de las muestras HAMA, PAAMAO, PCIT y digeridos de POS. El mayor valor fue obtenido por PAAMAO con un porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa de 63.57% y la menor con un valor de 6.28% para las muestras de PAAMAO y la fracción disponible en el colon *In* de los digeridos, respectivamente. La extrusión de HAMA mostró un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) en el porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa para el caso de PAAMAO, mientras que en el caso de la POS no hubo diferencia estadística significativa ( $p > 0.05$ ). Existió diferencia estadística significativa entre las dos pastas extrudidas, con valores de 63.57% para PAAMAO y de 42.94% para POS. La digestión de POS mostró una disminución ( $p < 0.05$ ) para el caso de la fracción disponible en el colon *in*, sin embargo, no mostró cambios en el caso de la fracción basolateral *out* ( $p > 0.05$ ). Las pastas extrudidas mostraron un porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa mayor ( $p < 0.05$ ) que la PCIT.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1 Características de calidad de cocción de la pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAMAAO) y una pasta comercial integral de trigo (PCIT)

La composición de los materiales que se utilizan para la preparación de pastas afecta directamente en las propiedades físicas, químicas y texturales de las pastas (Nilusha y col., 2019).

El tiempo óptimo de cocción (TOC) de una pasta es el tiempo necesario para obtener la gelatinización completa del almidón, la PAAMAO y POS mostraron un mayor TOC respecto a la PCIT. El TOC influye sobre el sabor y textura de las pastas, si una pasta se cocina menos de lo indicado estará dura y tendrá un sabor a harina; pero si, por lo contrario, la pasta es sobre cocida estas se hacen blanquecinas y se rompen fácilmente además de tener una textura suave, elástica y pegajosa que causa una sensación desagradable en la boca (Granito y Ascanio, 2009). Se ha mencionado en la bibliografía que la adición de ingredientes no tradicionales a las pastas disminuye el tiempo de cocción, lo cual se ha reportado como un efecto negativo en la elaboración de las pastas (Cárdenas-Hernández et al., 2016). Sin embargo, en el presente trabajo no se observó dicho efecto negativo para las dos pastas formuladas (PAAMAO y POS) (**Tabla 2**), a pesar de que los ingredientes principales de la pasta son ingredientes no tradicionales como el amaranto y maíz azul; esto pudiera ser debido a que estos granos presentan una temperatura de gelatinización más alta respecto a la del trigo (Palavecino et al., 2020).

De igual manera que con el TOC, la pérdida de sólidos por cocción (PSPC) (**Tabla 2**) mostró un mayor porcentaje en la PAAMAO y POS respecto a la pasta comercial integral de trigo (PCIT). Esto ocurre a raíz de la sustitución completa o parcial de sémola de trigo por ingredientes no convencionales, como el amaranto y maíz azul, lo que afecta negativamente la red de almidón-

gluten permitiendo que el almidón gelatinizado se escape de la pasta durante el cocimiento (Cárdenas-Hernández y col., 2016; Nilusha y col., 2019). En un estudio hecho por Granito y Ascanio en 2019, en el cual se sustituyó el 10% de la sémola de trigo y se adicionó una leguminosa *Cajanus cajan*; Ellos hicieron una pasta con sémola de trigo (80%) más harina integral de trigo (4%) más salvado de trigo en hojuelas (6%) más *Cajanus cajan* (10%) y obtuvieron una PSPC de 20.1%, un valor mayor al obtenido por POS con una mismo porcentaje de adición de sémola de trigo (10%) y un valor próximo al obtenido para la PAAMAO, la cual cabe destacar, fue hecha 100% de ingredientes no convencionales sin adición de ningún componente de trigo para mejorar las características funcionales como es la PSPC.

## **7.2 Propiedades tecnofuncionales de harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo PCIT.**

Propiedades tecnofuncionales son las que afectan las características sensoriales de los alimentos y juegan un papel importante en el comportamiento físico de los alimentos o sus ingredientes durante la preparación, procesamiento y almacenamiento (Chel-Guerrero et al., 2002).

El índice de absorción de agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA) reflejan los cambios en las moléculas de almidón como resultado de la extrusión (Cuj-Laines et al., 2018).

El IAA mostró un aumento significativo después de la extrusión para el caso de las pastas obtenidas (PAAMAO y POS) (**Tabla 3**), esto puede ser debido a la desnaturalización de proteínas, gelatinización del almidón e hinchamiento de la fibra cruda que suceden a causa de las temperaturas y fuerzas mecánicas hechas por el proceso de extrusión (Cuj-Laines y col., 2018). También se encontraron diferencias del IAA entre PAAMAO y POS con respecto a PCIT (**Tabla 3**), debido a las diferencias en los aminoácidos y el

contenido de proteínas como es el gluten presente en POS (Peter & Gandhi, 2017). El IAA mide la cantidad de agua absorbida por los gránulos de almidón después de hincharse con un exceso de agua y se puede utilizar como índice de gelatinización. IAA también está relacionado con el equilibrio hidrófilo de las proteínas presentes en la mezcla (balance hidrofílico-hidrofóbico), que cambia según el grado de desnaturalización de las proteínas y los perfiles de solubilidad dependen del proceso de extrusión. un IAA bajo indica disponibilidad restringida de agua para el gránulo de almidón debido a una estructura más compacta (Al-Shamsi et al., 2018; Cuj-Laines et al., 2018).

El ISA es un indicador que refleja la transformación del almidón y degradación de componentes de fibra dietaria debidas a la intensidad de las condiciones de extrusión. Se utiliza para medir el grado de conversión del almidón, que es la cantidad de polisacáridos solubles liberados de los componentes del almidón después de la extrusión (Y. Huang et al., 2016; Rashid et al., 2015). La PCIT obtuvo un mayor valor de ISA mientras que HAMA mostró el menor. Las pastas obtenidas (PAAMAO y POS) mostraron valores menores que la PCIT (**Tabla 3**), indicando una posible mayor degradación de fibra dietaria y transformación de almidón. Los cambios observados de HAMA con PAAMAO y POS pudieron ser ocasionados por las condiciones de extrusión que ocasionaron cambios en el almidón (Cuj-Laines y col., 2018).

El índice de absorción de aceite es una propiedad funcional importante que debe analizarse, ya que implica el mantenimiento del sabor y la sensación en la boca de los alimentos mediante el atrapamiento físico del aceite en los capilares (Gupta et al., 2019). El índice de absorción de aceite puede ser afectado por muchos factores, tales como la cantidad de proteínas, el número de sitios no polares e interacciones de proteína-lípidos-carbohidratos (Al-Shamsi et al., 2018). Sin embargo, en este estudio no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $P > 0.05$ ) entre las muestras para

este parámetro (**Tabla 3**). Finalmente, los resultados de la determinación de pH, no mostraron diferencias estadísticas significativas ( $P > 0.05$ ) entre las muestras analizadas (**Tabla 3**). Los resultados de pH indica que las tres muestras son alimentos ligeramente ácidos en el rango normal de alimentos comestibles (Andrés-Bello y col., 2013).

El color de las pastas es un parámetro de calidad de los alimentos. Es el primer atributo que los consumidores juzgan de los productos (Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014) y consideran como uno de los atributos más importantes para aceptarlos (GULL et al., 2018). El valor *Hunter L* se refiere al nombre de luminosidad o claridad (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014). Las muestras evaluadas presentaron una disminución en el valor *Hunter L*, esto se debe a que el proceso de extrusión tiende a disminuir este valor en los alimentos conforme sube la temperatura y el porcentaje de humedad (Kaur et al., 2015). La coordenada *a* se refiere a desviación hacia el rojo si es positiva y hacia el verde si es negativa, mientras que la coordenada *b* define la desviación hacia el amarillo si es positiva y hacia el azul si es negativa (Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014). El valor *a* obtuvo una disminución, haciendo que la muestra tuviera un menor enrojecimiento, este comportamiento al igual que en el valor *Hunter L*, se debe a las condiciones de la extrusión (Kaur et al., 2015). La adición del 10% de sémola a la formulación hizo que POS obtuviera un mayor valor *b*, indicando que la pasta se volvió más amarilla (**Tabla 3**). Se desea que las pastas frescas tengan un color más amarillo, esto como un importante atributo de calidad del producto (Bastos et al., 2016). Las diferencias encontradas en las propiedades funcionales se deben principalmente a que las proteínas de PAAMAO y POS (total o mayormente de amaranto y maíz azul) no pueden desarrollar la misma estructura que las proteínas de la PCIT (gluteninas y gliadinas) y la funcionalidad de la red de gluten la ejercen otros ingredientes, como el almidón (Palavecino et al., 2020).



### **7.3 Composición proximal, digestibilidad proteínica *in vitro*, perfil de aminoácidos y C-PER de harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).**

La extrusión puede ocasionar muchos cambios químicos y estructurales en los alimentos como la gelatinización del almidón, desnaturalización de proteínas, formación de complejos entre amilosa y lípidos, entre otros (Jafari et al., 2017). El contenido de proteínas de la HAMA no obtuvo cambios significativos después de la extrusión en comparación con la PAAMAO o POS (**Tabla 4**). La extrusión per se, no provoca cambios en el contenido de nitrógeno, sin embargo, pueden ocasionar otro tipo de cambios importantes en su digestibilidad debido a las fuerzas mecánicas que actúan dentro del extrusor (Alam et al., 2016; Navale et al., 2015). Chávez-Jáuregui et al., Chávez-Jauregui (2000) y Menegassi et al., (2011), demostraron un comportamiento similar en sus extrudidos de amaranto (*Amaranthus caudatus*), en donde el contenido de proteínas no se veía modificado, con la particularidad de que ellos notaron que la biodisponibilidad aumentaba después del procesamiento, algo que podría estar sucediendo en las pastas obtenidas (PAAMAO y POS). Los lípidos sirven como plastificantes o lubricantes reduciendo la fricción durante el proceso de extrusión (Offiah et al., 2019). El contenido de lípidos de POS no mostró diferencia significativa ( $p>0.05$ ) y los de PAAMAO mostraron un aumento significativo ( $p<0.05$ ) en comparación a HAMA a pesar de que la extrusión tiende a disminuir el contenido de los mismos (Milán-Carrillo y col., 2012) (**Tabla 4**). Normalmente la disminución de lípidos ocurre por la gelatinización del almidón, formando complejos lípidos-almidón, llevando a la pérdida de aceites debido a las altas temperaturas y alta presión que involucra la extrusión (Dalbhat et al., 2019). De la misma manera, el contenido de lípidos también puede disminuir si las condiciones de extrusión son muy agresivas (Velocidades de tornillo elevadas y altas temperaturas de más de 100°C), sin embargo, la combinación de las

condiciones de extrusión utilizadas en el presente trabajo no permitió este cambio. También, existe la posibilidad de que el almidón pueda interactuar con las macromoléculas formando complejos con lípidos y proteínas, previniendo su disminución y el aumento podría atribuirse a la adición de monoglicéridos en las harinas. El contenido de cenizas es un atributo de calidad importante para la evaluación de alimentos, un valor más alto de cenizas implica una cantidad mayor de minerales, para el caso de HAMA con PAAMAO no se encontraron diferencias en el contenido de cenizas (**Tabla 4**). Esto se explica debido a que los minerales son termoestables y son muy difíciles de perderse durante el proceso de extrusión (Singh et al., 2007).

Se muestran los resultados de la digestibilidad proteínica *in vitro* (DPIV) de la HAMA y POS en la (**Tabla 5**). La DPIV mostró un aumento significativo después de la extrusión y adición de sémola a la muestra. En estudios anteriores se ha documentado que la extrusión ocasiona un aumento en este parámetro (Atukuri et al., 2019; Patil et al., 2016; Singh et al., 2007; Gámez-Valdez y col., 2020). La DPIV de tortillas hechas a base de harinas de amaranto y maíz azul sometidas a extrusión fueron reportadas por Gámez-Valdez y col., 2020. Ellos encontraron en su trabajo que ambas harinas mostraron un aumento significativo de este parámetro, con valores similares a los encontrados en esta investigación. El incremento de la DPIV en las pastas se pudo deber a diversos factores. Entre los que tienen mayor influencia, se encuentran el calentamiento y cizallamiento (fuerza mecánica) que, en conjunto con la humedad de la muestra, ocasionan una degradación de complejos proteínicos y la desnaturalización de proteínas (Palil y col., 2016; Atukuri y col., 2019) facilitando a que las enzimas hidrolízen de manera más sencilla a las proteínas (Singh et al., 2007). Por último, también es posible que una parte del incremento pueda deberse a que durante el procesamiento de las pastas se destruyan los factores antinutricionales, los cuales, tienden a

disminuir la DPIV (Palil y col., 2016). Sin embargo, estos últimos factores mencionados no fueron estudiados en esta investigación.

Los valores de C-PER obtenidos para HAMA y POS fueron mayores (**Tabla 6**) a los anteriormente reportados por Gámez-Valdez y col., 2020, quienes analizaron las propiedades nutricionales de tortillas hechas con harinas extrudidas de maíz azul fortificadas con amaranto. La puntuación de aminoácidos corregida por digestibilidad de proteínas (PDCAAS) se utiliza para determinar qué tan bien la proteína de la dieta puede igualar la demanda de aminoácidos y para permitir la predicción de la utilización de las proteínas de la dieta, esta se obtiene multiplicando el valor más bajo de aminoácidos por el porcentaje de digestibilidad proteínica *in vitro* de la muestra (Culetu y col., 2021). Es el parámetro más recomendado para determinar la calidad proteínica del alimento. Este valor debe ser por arriba de 0.6 para satisfacer las necesidades de aminoácidos, ambas muestras evaluadas sobrepasan el valor recomendado (Milán-Noris y col., 2019) (**Tabla 6**). El pBV, que estima la cantidad de proteína ingerida que es anabolizada en el organismo fue mayor en POS respecto a HAMA (**Tabla 6**).

#### **7.4 Actividad antioxidante por capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC) de una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO), pasta optimizada con sémola (POS) y pasta comercial integral de trigo (PCIT), digeridos de POS fracción disponible en el colon *In* y fracción basolateral *Out*.**

El procesamiento de alimentos mediante extrusión tiene un gran potencial de retención de los compuestos fenólicos y actividad antioxidante con respecto a otros métodos (Gámez- Valdez y col., 2020). Los resultados obtenidos para la PAAMAO se encontraron por arriba de los rangos esperados tomando en cuenta la actividad antioxidante previamente reportada para amaranto extrudido por Milán-Carrillo et al., (2012) (3903  $\mu\text{mol}$  Equivalentes

de trolox (ET)/100g muestra) y de maíz azul extrudido reportados por Gámez-Valdez y col., 2020 (15587 $\mu$ mol Equivalentes de trolox (ET)/100g muestra). La actividad antioxidante ORAC de las pastas optimizadas mostraron una disminución en la fracción libre y un aumento de la fracción ligada (**Tabla 7**). Este comportamiento fue similar al reportado por Milán-Carrillo y col., 2012, quienes muestran la actividad antioxidante de una harina optimizada de amaranto extrudido. En términos generales, existe una disminución de la actividad antioxidante total de la harina cruda a las harinas extrudidas PAAMAO y POS a la par de una disminución de los compuestos fenólicos. Se ha reportado en la bibliografía que los compuestos fenólicos son los principales contribuidores a la actividad antioxidante (Gaxiola-Cuevas et al., 2017), siendo los contenidos en la fracción ligada los principales contribuidores de la actividad antioxidante (Gámez-Valdez y col., 2020). La elaboración de pastas con ingredientes no convencionales puede mejorar la actividad antioxidante del alimento en comparación a pastas tradicionales (Gull y col., 2018).

#### **7.5 Efecto de la extrusión sobre el contenido de compuestos fenólicos totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo (PCIT).**

Los compuestos fenólicos son producto del metabolismo secundario de las plantas, son conocidos por su actividad antioxidante y otras capacidades bioactivas que reducen el riesgo de enfermedades degenerativas como la diabetes mellitus tipo 2 (Camelo-Méndez et al., 2018). Los resultados del contenido de compuestos fenólicos muestran cambios entre HAMA, PAAMAO y POS para la fracción libre, ligada y en fenólicos totales (**Tabla 8**). El contenido de compuestos fenólicos ligados fue el que aportó mayor cantidad al contenido total en todas las muestras evaluadas, esto podría ser debido a que la mayor cantidad de fenólicos se encuentran ligados a las paredes celulares (Mora-Rochin et al., 2010b; Ortiz-Cruz et al., 2020; Urias-Lugo et al.,

2015). Los resultados muestran una reducción en el contenido de fenólicos totales de PAAMAO y POS en comparación con la HAMA (**Tabla 8**). Esto podría ser debido a que los compuestos fenólicos son termolábiles y su reducción es debida al propio proceso de extrusión que emplea temperaturas que superan los 80°C (Mora-Rochín y col., 2010b; Camelo-Méndez y col., 2018). A pesar de la disminución, se aprecia una alta retención de estos compuestos, la cual es de un 80.54%, un porcentaje de retención similar al reportado por Gámez-Valdez y col., (2020) para una tortilla de maíz azul adicionada con harina de amaranto. La adición de sémola a la formulación no ocasionó cambios significativos en el contenido total de fenólicos (**Tabla 8**).

#### **7.6 Efecto de la extrusión en el contenido de flavonoides totales en una harina de amaranto y maíz azul (HAMA), pasta alimenticia de amaranto y maíz azul optimizada (PAAMAO) y pasta comercial integral de trigo (PCIT)**

Los resultados de flavonoides de la fracción ligada, libre y totales para HAMA, PAAMAO, POS y PCIT se muestran en la **Tabla 9**. Los flavonoides totales de HAMA observados en esta investigación cayeron dentro de los rangos reportados por Loarca-Piña et al., (2019) y Sandoval-Sicairos et al., (2020) para maíz azul y amaranto. La HAMA disminuyó su contenido de flavonoides después de ser sometida a extrusión, esto pudo ser debido a la combinación de humedad y temperatura que ocurre durante la extrusión (Sharma et al., 2012). La PAAMAO mostró una retención de 80.93% y POS un 86.11% (**Tabla 9**), este porcentaje fue similar al obtenido por Patil y col (2016) quienes reportaron el mismo comportamiento en sus extrudidos de Sorgo, con porcentajes de retención del 41-89%, utilizando incluso temperaturas mayores a la utilizada en la obtención de PAAMAO y POS. La PAAMAO también mostró una mayor cantidad de flavonoides que la PCIT (**Tabla 9**), logrando retener un alto porcentaje, mientras que POS no obtuvo diferencia frente a PCIT. Conocer el contenido total de flavonoides es de importancia ya que estos metabolitos

secundarios de las plantas se han relacionado con efectos beneficiosos en la salud, destacando principalmente su capacidad antioxidante y la posiciona a PAAMAO mejor frente a su contraparte comercial (D'Amelia et al., 2018).

### **7.7 Efecto de la extrusión y digestión simulada *in vitro* sobre el contenido de proteína soluble (PS).**

El proceso de extrusión ocasionó una disminución significativa ( $p < 0.05$ ) en el contenido de proteína soluble del 40.99% y 45.13% para PAAMAO y POS, respectivamente (**Tabla 10**). Sin embargo, los valores de PS de los digeridos incrementaron significativamente ( $p < 0.05$ ) en la fracción *In*, siendo un 28.67% mayor después de la digestión simulada *in vitro* (**Tabla 10**). Se ha reportado anteriormente por Montoya-Rodríguez y col (2014) y Sandoval-Sicairos y col. (2021) que la digestión simulada *in vitro* aumenta el contenido de PS debido a la generación de péptidos con bajo peso molecular ( $< 10\text{kDa}$ ). Consecuentemente, el incremento de PS se puede atribuir a cambios en la estructura de proteínas, la liberación de péptidos más pequeños y aminoácidos hidrofílicos, así como también por cambios en las fuerzas electrostáticas (García Arteaga et al., 2020).

### **7.8 Perfil de proteínas por SDS-PAGE**

Las bandas observadas concuerdan con los resultados reportados por Montoya-Rodríguez y col., (2020) quienes evaluaron el perfil de proteínas de hidrolizados de maíz azul procesado mediante molienda húmeda, las bandas observadas podrían corresponder a bandas pertenecientes a la  $\alpha$ -zeína y glutelinas de maíz (bandas 2 y 4, ver **Figura 2**). De la misma manera, los resultados encontrados concuerdan con los resultados previos obtenidos por Sandoval-Sicairos y col. (2020) quienes reportaron el perfil de proteínas de hidrolizados de amaranto sin procesar, las bandas observadas (ver **Figura 2**.) podrían corresponder a globulina 11S, albúmina de amaranto y prosistemina de acuerdo al estudio mencionado. El proceso de extrusión propició a la

desaparición y/o atenuación de bandas, como por ejemplo las que pertenecen a la globulina 11S y albúmina de amaranto, lo que se traduce en que se produjeron proteínas de menor masa molecular y péptidos (Montoya-Rodríguez y col., 2014). Al mismo tiempo, la digestión simulada *in vitro* produjo una desaparición de las bandas. Esta desaparición de bandas concuerda con los resultados reportados por Montoya-Rodríguez y col., (2014), Sandoval-Sicairos y col. (2020) y Montoya-Rodríguez y col., (2020) para digeridos de amaranto y de maíz azul, dicho comportamiento se puede explicar porque conforme pasa el tiempo en la digestión se incrementa la cantidad de péptidos de baja masa molecular (<7.1kDa) y aminoácidos libres, debido a la hidrólisis enzimática los cuales no son detectados en el perfil de proteínas por tener un peso molecular menor a la banda más pequeña que se tiene en el marcador (10 KDa).

### **7.9 Actividad hipoglucemiante. Inhibición *in vitro* de $\alpha$ -amilasa y $\alpha$ -glucosidasa de HAMA, PAAMAO, POS, PCIT, fracción *in* y fracción *out*.**

Las actividades de inhibición *in vitro* de las enzimas  $\alpha$ -amilasa y  $\alpha$ -glucosidasa de extractos de especies del género *Amaranthus* y en maíz azul, han sido descritas con anterioridad (Conforti et al., 2005; Nkobole et al., 2021; Smorowska et al., 2021). Se mide la inhibición de  $\alpha$ -amilasa y  $\alpha$ -glucosidasa porque una mayor inhibición de estas dos enzimas retrasa la conversión de almidón en monosacáridos, haciendo que se retrase la absorción de carbohidratos complejos, resultando en una absorción disminuida de glucosa en la sangre, previniendo la hiperglicemia (Kehinde y Sharma, 2018). La inhibición de ambas enzimas es uno de los efectos farmacológicos más comúnmente usados para el tratamiento de la hiperglicemia (Gutiérrez-Grijalva et al., 2018).

Los resultados obtenidos para la PAAMAO y POS fueron mayores para en la inhibición de  $\alpha$ -amilasa y menores para en la inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa (**Tabla 11**) que los reportados anteriormente por Nkobole y col., 2021, quienes

analizaron la inhibición *in vitro* de las enzimas  $\alpha$ -amilasa y  $\alpha$ -glucosidasa de extractos y compuestos aislados de las plantas de distintas especies de amaranto. En su estudio, mostraron resultados máximos de inhibición de 34.25% de inhibición de  $\alpha$ -amilasa y 90.91% para  $\alpha$ -glucosidasa, mientras que los encontrados en esta investigación fueron de 41.11% en PAAMAO y 41.31% en POS de inhibición de  $\alpha$ -amilasa, y valores de inhibición de 63.57 y 42.94% de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa para PAAMAO y POS, respectivamente (**Tabla 11**). De la misma manera, comparando los resultados obtenidos con los resultados del estudio de Conforti y col., (2005), en esta investigación se obtuvieron valores aproximados a los que ellos reportan para la inhibición de  $\alpha$ -amilasa de extractos metanólicos de dos variedades de *Amaranthus caudatus*. Conforti y col., (2005), reportan valores de 50.5%, 28% para las variedades Oscar blanco y Víctor Rojo, respectivamente. Todos los resultados obtenidos fueron menores que los reportados para maíz azul y amarillo reportados por Smorowska y col. (2021) quienes reportaron una inhibición del 100% de la enzima  $\alpha$ -amilasa en extractos metanólicos acidificados de diferentes cultivares sin diluir.

Las fracciones resultantes de la digestión de POS, mostraron inhibición *in vitro* de  $\alpha$ -amilasa y  $\alpha$ -glucosidasa. La digestión *in vitro* ocasionó una disminución en la inhibición de la enzima para las fracciones *in* y *out* obtenidas (**Tabla 11**). Dicho comportamiento ha sido reportado por Gutiérrez-Grijalva y col. (2018), quienes observaron una disminución en el porcentaje de inhibición de  $\alpha$ -glucosidasa de tres muestras evaluadas de extractos de órgano sometidas a una digestión *in vitro* similar a la que fue sometida POS. A la vez, Gutiérrez-Grijalva y col. (2018) también reportan un aumento en la actividad inhibitoria de  $\alpha$ -amilasa, caso contrario a lo encontrado en esta investigación. La disminución encontrada podría deberse a los cambios de pH que ocurren durante las diferentes fases de la digestión (Gutiérrez-Grijalva y col., 2018) y



a los cambios estructurales y químicos que suceden en las muestras durante la digestión gastrointestinal (B. Huang et al., 2015).

De acuerdo a los resultados obtenidos, las pastas elaboradas a base de *Amaranthus hypochondriacus* y *Zea mays* (maíz azul elotero de Sinaloa) podrían ser una fuente natural de ingredientes para el manejo de la hiperglicemia y, por ende, para el control de las complicaciones relacionadas con la diabetes (Peter & Gandhi, 2017). Se sugiere que se realicen más estudios, entre ellos pruebas *in vivo* y en un futuro ensayos clínicos para comprobar su verdadera eficacia y dosis recomendadas para ver un efecto positivo en el organismo.

## 8. CONCLUSIONES

Se logró obtener una pasta de amaranto y maíz azul, la cual fue caracterizada tecnofuncional, nutricional y nutracéuticamente. Se encontró actividad hipoglucemiante en las pastas obtenidas.

La extrusión y adición de sémola a las pastas obtenidas mejoró las características tecnofuncionales deseadas como el tiempo de cocción y pérdida de sólidos por cocción, aproximándose más a las de su contraparte comercial.

La extrusión de la harina de maíz azul y amaranto no mostró cambiar la composición nutrimental de las pastas obtenidas. Sin embargo, mejoraron otros parámetros de importancia, como la digestibilidad proteínica *in vitro*, la relación de eficiencia de proteína calculada (C-PER) y el valor biológico predicho. Además, POS mostró cubrir con las necesidades de aminoácidos azufrados gracias a la incorporación de amaranto en la formulación, complementando a la vez los aminoácidos limitantes del maíz azul.

Las pastas obtenidas mostraron valores de retención importantes de compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante, otorgando un valor agregado al alimento. Las pastas obtenidas de maíz azul y amaranto mostraron actividad hipoglucemiante.

La elaboración de pastas hechas con ingredientes no convencionales, como el amaranto y maíz azul, son una alternativa interesante para el mejoramiento de las capacidades funcionales del alimento que permitiría utilizar las pastas como un alimento funcional en la prevención y/o control de enfermedades crónicas.

## **9. RECOMENDACIONES**

Se recomienda continuar con el trabajo de investigación en laboratorio para determinar el potencial hipoglucemiante de la pasta de amaranto y maíz azul en modelos *in vivo* para en un futuro tener referencias de un posible estudio clínico de ser posible. De la misma manera, se recomienda también mejorar las características funcionales de la pasta, mediante la adición de diferentes componentes, para que esta se acerque más a los valores de referencia de pastas comerciales elaboradas con ingredientes convencionales.

## 10. REFERENCIAS

- AACC. (1995).** *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemist's AACC. 1995 Approved Methods of the American Association of Cereal Chemist's. 9a ed. St. Paul, MN, EUA.*
- Acosta, R., & Acosta, M. C. R. (2009).** Reseña EL CULTIVO DEL MAÍZ, SU ORIGEN Y CLASIFICACIÓN. EL MAIZ EN CUBA. *Cultivos Tropicales*, 30(2), 113–120.
- Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002).** Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6182–6187. <https://doi.org/10.1021/JF0205099>
- Adom, K. K., Sorrells, M. E., & Rui, H. L. (2005).** Phytochemicals and antioxidant activity of milled fractions of different wheat varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6), 2297–2306. <https://doi.org/10.1021/JF048456D>
- Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H., & Gupta, K. (2016).** Extrusion and Extruded Products: Changes in Quality Attributes as Affected by Extrusion Process Parameters: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445–473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
- Alemayehu, F., ... M. B.-J. of A., & 2015, undefined. (2014).** The Potential for Utilizing the Seed Crop Amaranth (*Amaranthus* spp.) in East Africa as an Alternative Crop to Support Food Security and Climate Change Mitigation. *Wiley Online Library*, 201(5), 321–329. <https://doi.org/10.1111/jac.12108>
- Al-Shamsi, K. A., Mudgil, P., Hassan, H. M., & Maqsood, S. (2018).** Camel milk protein hydrolysates with improved technofunctional properties and enhanced antioxidant potential in in vitro and in food model systems. *Journal of Dairy Science*, 101(1), 47–60. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13194>

- AOAC. 1999.** Official methods of analysis. 16th ed. Association of Analyst Chemists. Gaithersburg, MD, USA. Cap. 4, pp. 25; cap.12, pp. 7; cap.32, pp. 1-2; cap. 45, pp. 59-60. Arora, B., Yoon, A., Sriram, M., ... P. S.-I. F. S. & & 2020, undefined. (2020). Reactive extrusion: A review of the physicochemical changes in food systems. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856420303751>
- Ashok Kumar, B. S., Lakshman, K., Jayaveea, K. N., Sheshadri Shekar, D., Saleemulla Khan, Thippeswamy, B. S., & Veerapur, V. P. (2012).** Antidiabetic, antihyperlipidemic and antioxidant activities of methanolic extract of *Amaranthus viridis* Linn in alloxan induced diabetic rats. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 64(1–2), 75–79. <https://doi.org/10.1016/J.ETP.2010.06.009>
- Atukuri, J., Odong, B., nutrition, J. M.-F. science & , & 2019, undefined. (2019).** Multi-response optimization of extrusion conditions of grain amaranth flour by response surface methodology. *Wiley Online Library*, 7(12), 4147–4162. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1284>
- Basto-Abreu, A., ... T. B.-G. pública, & 2020, undefined. (2020).** Prevalencia de diabetes y descontrol glucémico en México: resultados de la Ensanut 2016. *medigraphic.com*. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=91020>
- Bastos, G. M., Soares Júnior, M. S., Caliari, M., de Araujo Pereira, A. L., de Moraes, C. C., & Campos, M. R. H. (2016).** Physical and sensory quality of gluten-free spaghetti processed from amaranth flour and potato pulp. *LWT*, 65, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.067>
- Bello-Pérez, L., ... P. F.-C., & 2015, undefined. (2015).** Effect of the nixtamalization process on the dietary fiber content, starch digestibility,

and antioxidant capacity of blue maize tortilla. *Wiley Online Library*, 92(3), 265–270. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-06-14-0139-R>

**Bigliardi, B., Technology, F. G.-T. in F. S. (2013).** Innovation trends in the food industry: the case of functional foods. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224413000678>

**Bordoloi, R., and, S. G.-I. J. of S. R., (2014).** Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *researchgate.net*. [https://www.researchgate.net/profile/Subha-Ganguly/publication/263535708\\_EXTRUSION\\_TECHNIQUE\\_IN\\_FOOD\\_PROCESSING\\_AND\\_A\\_REVIEW\\_ON\\_ITS\\_VARIOUS\\_TECHNOLOGICAL\\_PARAMETERS/links/0f31753b2c896be73a000000/EXTRUSION-TECHNIQUE-IN-FOOD-PROCESSING-AND-A-REVIEW-ON-ITS-VARIOUS-TECHNOLOGICAL-PARAMETERS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Subha-Ganguly/publication/263535708_EXTRUSION_TECHNIQUE_IN_FOOD_PROCESSING_AND_A_REVIEW_ON_ITS_VARIOUS_TECHNOLOGICAL_PARAMETERS/links/0f31753b2c896be73a000000/EXTRUSION-TECHNIQUE-IN-FOOD-PROCESSING-AND-A-REVIEW-ON-ITS-VARIOUS-TECHNOLOGICAL-PARAMETERS.pdf)

**Camelo-Méndez, G. A., Tovar, J., & Bello-Pérez, L. A. (2018).** Influence of blue maize flour on gluten-free pasta quality and antioxidant retention characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2739–2748. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3196-9>

**Cárdenas-Hernández, A., Beta, T., Loarca-Piña, G., Castaño-Tostado, E., Nieto-Barrera, J. O., & Mendoza, S. (2016).** Improved functional properties of pasta: Enrichment with amaranth seed flour and dried amaranth leaves. *Journal of Cereal Science*, 72, 84–90.

**Care, A. D. A.-D., & 2022, undefined. (2022).** Introduction: Standards of Medical Care in Diabetes—2022. *Am Diabetes Assoc*. [https://diabetesjournals.org/care/article-abstract/45/Supplement\\_1/S1/138921](https://diabetesjournals.org/care/article-abstract/45/Supplement_1/S1/138921)

**Chávez-Jáuregui, R. N., Silva, M. E. M. P., & Areas, J. A. G. (2000).** Extrusion cooking process for amaranth (*Amaranthus caudatus* L.).

*Journal of Food Science*, 65(6), 1009–1015.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb09408.x>

**Chel-Guerrero, L., Pérez-Flores, V., Betancur-Ancona, D., & Davila-Ortiz, G. (2002).** Functional properties of flours and protein isolates from *Phaseolus lunatus* and *Canavalia ensiformis* seeds. *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 50(3), 584–591.

**Chmelík, Z., Šnejdrlová, M., Research, M. V.-N., & 2019, undefined. (2019).** Amaranth as a potential dietary adjunct of lifestyle modification to improve cardiovascular risk profile. *Elsevier*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0271531719302568>

**Choton, S., Gupta, N., Bandral, J., ... N. A.-T. P., & 2020, undefined. (2020).** Extrusion technology and its application in food processing: A review. *researchgate.net*. <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367>

**Clouse, J. W., Adhikary, D., Page, J. T., Ramaraj, T., Deyholos, M. K., Udall, J. A., Fairbanks, D. J., Jellen, E. N., Maughan, P. J., Clouse, J., Page, J., Udall, J., Jellen, E., Maughan, P., Young Univ, B., & Deyholos, M. (2016).** The amaranth genome: genome, transcriptome, and physical map assembly. *Wiley Online Library*, 9(1).  
<https://doi.org/10.3835/plantgenome2015.07.0062>

**Coelho, L., Silva, P., Martins, J., function, A. P.-F. & 2018, undefined. (2018).** Emerging opportunities in exploring the nutritional/functional value of amaranth. *pubs.rsc.org*.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/fo/c8fo01422a>

**Conforti, F., Statti, G., Loizzo, M. R., Sacchetti, G., Poli, F., & Menichini, F. (2005).** In vitro antioxidant effect and inhibition of  $\alpha$ -amylase of two varieties of *Amaranthus caudatus* seeds. *jstage.jst.go.jp*, 28(6), 1098–1102. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/bpb/28/6/28\\_6\\_1098/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/bpb/28/6/28_6_1098/_article/-char/ja/)

- Cornejo, F., Novillo, G., Villacrés, E., International, C. R.-F. R., & 2019, undefined. (2019).** Evaluation of the physicochemical and nutritional changes in two amaranth species (*Amaranthus quitensis* and *Amaranthus caudatus*) after germination. *Elsevier*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996919300225>
- Cuj-Laines, R., Hernández-Santos, B., Reyes-Jaquez, D., Delgado-Licon, E., Juárez-Barrientos, J. M., & Rodríguez-Miranda, J. (2018).** Physicochemical properties of ready-to-eat extruded nixtamalized maize-based snacks enriched with grasshopper. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(8), 1889–1895.
- Culetu, A., Susman, I. E., Duta, D. E., & Belc, N. (2021).** Nutritional and functional properties of gluten-free flours. *Applied Sciences*, 11(14), 6283.
- Dalbhat, C. G., Mahato, D. K., & Mishra, H. N. (2019).** Effect of extrusion processing on physicochemical, functional and nutritional characteristics of rice and rice-based products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 226–240.
- D’Amelia, V., Aversano, R., Chiaiese, P., & Carputo, D. (2018).** The antioxidant properties of plant flavonoids: their exploitation by molecular plant breeding. En *Phytochemistry Reviews* (Vol. 17, Número 3, pp. 611–625). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11101-018-9568-y>
- D’Amico, S., grains, R. S.-G. ancient, & 2017, undefined. (2017).** Amaranth: Its unique nutritional and health-promoting attributes. *Elsevier*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008100866900006>
- Dendup, T., Feng, X., Clingan, S., of, T. A.-B.-I. journal. (2018).** Environmental risk factors for developing type 2 diabetes mellitus: a systematic review. *mdpi.com*. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010078>



- Dewanto, V., Wu, X., food, R. L.-J. of A. (2002).** Processed sweet corn has higher antioxidant activity. *ACS Publications*, 50(17), 4959–4964. <https://doi.org/10.1021/jf0255937>
- Dey, D., Richter, J. K., Ek, P., Gu, B. J., & Ganjyal, G. M. (2021).** Utilization of Food Processing By-products in Extrusion Processing: A Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2020.603751/FULL>
- Eka, P., Processing, G. G.-C. C. G.. (2020).** *Basics of extrusion processing*. <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=XRHaDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Basics+of+extrusion+processing+Pichmony+Eka,b,+Giris+h+M.+Ganjyala+aSchool+of+Food+Science,+Washington+State+University,+Pullman,&ots=6wUMATYBiU&sig=WdRvGXI31QSt-yqiFMI-bHjmtog>
- Elena Chávez Valenzuela, M., Margarita Salazar, C., Hoyos Ruíz, G., Bautista Jacobo, A., González Lomeli, D., & Ernesto Ogarrio Perkins, C. (2018).** Actividad física y enfermedades crónicas no transmisibles de estudiantes mexicanos en función del género. *dialnet.unirioja.es*, 33. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6367747>
- García Arteaga, V., Apéstegui Guardia, M., Muranyi, I., Eisner, P., & Schweiggert-Weisz, U. (2020).** Effect of enzymatic hydrolysis on molecular weight distribution, techno-functional properties and sensory perception of pea protein isolates. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102449>
- Gaxiola-Cuevas, N., Mora-Rochín, S., Cuevas-Rodriguez, E. O., León-López, L., Reyes-Moreno, C., Montoya-Rodríguez, A., & Milán-Carrillo, J. (2017).** Phenolic Acids Profiles and Cellular Antioxidant Activity in Tortillas Produced from Mexican Maize Landrace Processed by Nixtamalization and Lime Extrusion Cooking. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72(3), 314–320. <https://doi.org/10.1007/s11130-017-0624-3>

- Girija, K., Lakshman, K., Udaya, C., ... G. S.-A. P. journal of, & 2011, undefined. (2011).** Anti-diabetic and anti-cholesterolemic activity of methanol extracts of three species of *Amaranthus*. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2221169111600117>
- Goñi, I., Chemistry, C. V.-G. (2003).** Chickpea flour ingredient slows glycemc response to pasta in healthy volunteers. *Elsevier*. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00480-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00480-6)
- Goodarzi, M. O. (2014).** Type 2 Diabetes. *Reference Module in Biomedical Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.00011-8>
- Graf, B. L., Rojas-Silva, P., Rojo, L. E., Delatorre-Herrera, J., Baldeón, M. E., & Raskin, I. (2015).** Innovations in Health Value and Functional Food Development of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 431–445. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12135>
- Granito, M., & Ascanio, V. (2009).** Desarrollo y transferencia tecnológica de pastas funcionales extendidas con leguminosas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 59(1), 71–77.
- GULL, A., KUMAR, P., SAFAPURI, T. A., KUMAR KHAJURIA, A., GANDOTRA, A., & JAN, R. (2018).** The effect of adding non-conventional ingredients and hydrocolloids to desirable quality attributes of pasta. A Mini Review. *Croatian Journal of Food Science and Technology*, 10(1), 106–111. <https://doi.org/10.17508/CJFST.2018.10.1.08>
- Gupta, A., Sharama, S., & Singh, B. (2019).** *Influence of Germination Conditions on the Techno-functional Properties of Amaranth flour*. <https://www.researchgate.net/publication/337561538>
- Gutiérrez-Grijalva, E. P., Picos-Salas, M. A., Leyva-López, N., Criollo-Mendoza, M. S., Vazquez-Olivo, G., & Heredia, J. B. (2018).** Flavonoids

and phenolic acids from Oregano: Occurrence, biological activity and health benefits. En *Plants* (Vol. 7, Número 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants7010002>

**HSU, H. W., VAVAK, D. L., SATTERLEE, L. D., & MILLER, G. A. (1977). A MULTIENZYME TECHNIQUE FOR ESTIMATING PROTEIN DIGESTIBILITY.** *Journal of Food Science*, 42(5), 1269–1273. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1977.TB14476.X>

**Huang, B., Wang, Z., Park, J. H., Ryu, O. H., Choi, M. K., Lee, J. Y., Kang, Y. H., & Lim, S. S. (2015).** Anti-Diabetic effect of purple corn extract on C57BL/KsJ db/db mice. *Nutrition Research and Practice*, 9(1), 17–21. <https://doi.org/10.4162/nrp.2015.9.1.22>

**Huang, Y., chemistry, Y. M.-F., & 2016, undefined. (2016).** The effect of extrusion processing on the physiochemical properties of extruded orange pomace. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814615010481>

**Iftikhar, M., & Khan, M. (2019).** Amaranth. *Bioactive Factors and Processing Technology for Cereal Foods*, 217–232. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6167-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6167-8_13)

**Jafari, M., Koocheki, A., & Milani, E. (2017).** Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates. *Journal of Cereal Science*, 75, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.05.005>

**Jaspers, L., Colpani, V., Chaker, L., ... S. van der L.-E. J. (2014).** The global impact of non-communicable diseases on households and impoverishment: a systematic review. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/s10654-014-9983-3>

- Karama'ckarama'c, M., Gai, F., Longato, E., Meineri, G., Janiak, M. A., Amarowicz, R., & Peiretti, P. G. (2019).** Antioxidant activity and phenolic composition of amaranth (*Amaranthus caudatus*) during plant growth. *mdpi.com*. <https://doi.org/10.3390/antiox8060173>
- Kaur, S., Sharma, S., Singh, B., & Dar, B. N. (2015).** Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans. *Journal of food science and technology*, *52*, 1670–1676.
- Kehinde, B., and, P. S.-C. reviews in food science. (2020).** Recently isolated antidiabetic hydrolysates and peptides from multiple food sources: A review. *Taylor & Francis*, *60(2)*, 322–340. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1528206>
- Kumar Sri, A. K., Shekar Devaangam, S., Khan, S., Ashok Kumar, B., Lakshman, K., Jayaveea, K., Sheshadri Shekar, D., Thippeswamy, B., & Veerapur, V. P. (2010).** Antihyperglycemic and antinociceptive properties of methanolic extract of whole plants of *Amaranthus viridis* L.(Amaranthaceae). *researchgate.net*, *64*, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.etp.2010.06.009>
- Leonard, W., Zhang, P., Ying, D., Xiong, Y., Chemistry, Z. F.-F., & 2021, undefined. (2021).** Extrusion improves the phenolic profile and biological activities of hempseed (*Cannabis sativa* L.) hull. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814620324687>
- Liu, B., engineering, Y. Z.-J. (2007).** Extraction of flavonoids from flavonoid-rich parts in tartary buckwheat and identification of the main flavonoids. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087740500734X>
- Loarca-Piña, G., Neri, M., Figueroa, J. de D., Castaño-Tostado, E., Ramos-Gómez, M., Reynoso, R., & Mendoza, S. (2019).** Chemical characterization, antioxidant and antimutagenic evaluations of pigmented

corn. *Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3177–3184.  
<https://doi.org/10.1007/s13197-019-03671-3>

**Mahmood, N. (2016).** A review of  $\alpha$ -amylase inhibitors on weight loss and glycemic control in pathological state such as obesity and diabetes. *Comparative Clinical Pathology*, 25(6), 1253–1264.  
<https://doi.org/10.1007/S00580-014-1967-X>

**Marti, A., Seetharaman, K., Science, M. P.-J. (2010).** Rice-based pasta: A comparison between conventional pasta-making and extrusion-cooking. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.07.002>

**Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014).** El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro sur*, 42(2), 57–66.

**Megías, C., Del Mar Yust, M., Pedroche, J., Lquari, H., Girón-Calle, J., Alaiz, M., Millán, F., & Vioque, J. (2004).** Purification of an ACE Inhibitory Peptide after Hydrolysis of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Protein Isolates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(7), 1928–1932.  
<https://doi.org/10.1021/JF034707R>

**Menegassi, B., Pílosof, A. M. R., & Arêas, J. A. G. (2011).** Comparison of properties of native and extruded amaranth (*Amaranthus cruentus* L. - BRS Alegria) flour. *LWT*, 44(9), 1915–1921.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.04.008>

**Milán-Carrillo, J., Montoya-Rodríguez, A., Gutiérrez-Dorado, R., Perales-Sánchez, X., & Reyes-Moreno, C. (2012).** Optimization of Extrusion Process for Producing High Antioxidant Instant Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) Flour Using Response Surface Methodology. *Applied Mathematics*, 03(10), 1516–1525.  
<https://doi.org/10.4236/am.2012.330211>

- Milán-Noris, A. K., De la Rosa-Millan, J., & Serna-Saldivar, S. O. (2019).** Comparative analysis of techno-functional properties, starch digestion and protein quality of pigmented chickpea flours. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(6), 2288–2299. <https://doi.org/10.1111/IJFS.14144>
- Montoya-Rodríguez, A., de Mejía, E. G., Dia, V. P., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2014).** Extrusion improved the anti-inflammatory effect of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) hydrolysates in LPS-induced human THP-1 macrophage-like and mouse RAW 264.7 macrophages by preventing activation of NF-κB signaling. *Molecular Nutrition and Food Research*, 58(5), 1028–1041. <https://doi.org/10.1002/MNFR.201300764>
- Montoya-Rodríguez, A., Gómez-Favela, M. A., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., & González De Mejía, E. (2015).** Identification of Bioactive Peptide Sequences from Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) Seed Proteins and Their Potential Role in the Prevention of Chronic. *Wiley Online Library*, 14(2), 139–158. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12125>
- Mora-Rochin, S., ... J. G.-U.-J. of C., & 2010, undefined. (2010a).** Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521010001682>
- Mora-Rochin, S., ... J. G.-U.-J. of C., & 2010, undefined. (2010b).** Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521010001682>
- Mora-Rochín, S., ... N. G.-C.-L.-F. S. (2016).** Effect of traditional nixtamalization on anthocyanin content and profile in Mexican blue maize (*Zea mays* L.) landraces. *Elsevier*.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S00236438163000>

93

**Moronta, J., Smaldini, P., Fossati, C., ... M. A.-J. of F. (2016).** The anti-inflammatory SSEDIKE peptide from Amaranth seeds modulates IgE-mediated food allergy. *Elsevier*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464616301748>

**Navale, S., Swami, S., Eat, N. T.-J. of R. to. (2015).** Extrusion cooking technology for foods: A review. *scholar.archive.org*, 2.  
[https://scholar.archive.org/work/7hliec524vaqxgpwhhke43sbyq/access/wayback/http://jakraya.com/journal/pdf/7-jrefArticle\\_1.pdf](https://scholar.archive.org/work/7hliec524vaqxgpwhhke43sbyq/access/wayback/http://jakraya.com/journal/pdf/7-jrefArticle_1.pdf)

**Neder-Suárez, D., Lardizabal-Gutiérrez, D., de Jesús Zazueta-Morales, J., Oralia Meléndez-Pizarro, C., Iván Delgado-Nieblas, C., Ramírez Wong, B., Gutiérrez-Méndez, N., Raúl Hernández-Ochoa, L., & Quintero-Ramos, A. (2021).** Anthocyanins and Functional Compounds Change in a Third-Generation Snacks Prepared Using Extruded Blue Maize, Black Bean, and Chard: An Optimization. *mdpi.com*.  
<https://doi.org/10.3390/antiox10091368>

**Nile, S., design, S. P.-C. biology & drug, & 2014, undefined. (2014).** Antioxidant,  $\alpha$ -Glucosidase and Xanthine Oxidase Inhibitory Activity of Bioactive Compounds From Maize (*Zea mays* L.). *Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cbdd.12205>

**Nilusha, R., Jayasinghe, J., ... O. P.-I. journal of, & 2019, undefined. (2019).** Development of pasta products with nonconventional ingredients and their effect on selected quality characteristics: A brief overview. *hindawi.com*.  
<https://www.hindawi.com/journals/ijfs/2019/6750726/>

**Nkobole, N., Bodede, O., Hussein, A. A., & Prinsloo, G. (2021).** In vitro  $\alpha$ -Glucosidase and  $\alpha$ -Amylase Activities of Wild and Cultivated *Amaranthus*

spp. and Isolated Compounds. *Pharmacognosy Journal*, 13(6s), 1614–1620. <https://doi.org/10.5530/PJ.2021.13.208>

**Offiah, V., Kontogiorgos, V., & Falade, K. O. (2019).** Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. En *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 59, Número 18, pp. 2979–2998). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007>

**Orona-Tamayo, D., sources, O. P.-L.-S. protein, & 2017, undefined. (2017).** Amaranth part 1—Sustainable crop for the 21st century: Food properties and nutraceuticals for improving human health. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128027783000159>

**Ortiz-Cruz, R. A., Ramírez-Wong, B., Ledesma-Osuna, A. I., Torres-Chávez, P. I., Sánchez-Machado, D. I., Montaña-Leyva, B., López-Cervantes, J., & Gutiérrez-Dorado, R. (2020).** Effect of Extrusion Processing Conditions on the Phenolic Compound Content and Antioxidant Capacity of Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Bran. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(2), 252–257. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00810-6>

**Ou, B., Huang, D., Hampsch-Woodill, M., Flanagan, J. A., & Deemer, E. K. (2002).** Analysis of Antioxidant Activities of Common Vegetables Employing Oxygen Radical Absorbance Capacity (ORAC) and Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) Assays: A Comparative Study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(11), 3122–3128. <https://doi.org/10.1021/JF0116606>

**Palavecino, P., Curti, M., Bustos, M., ... M. P.-P. F. for H., & 2020, undefined. (2020).** Sorghum Pasta and Noodles: Technological and Nutritional Aspects. *Springer*. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11130-020-00829-9.pdf>



- Patil, S. S., Brennan, M. A., Mason, S. L., & Brennan, C. S. (2016).** The effects of fortification of legumes and extrusion on the protein digestibility of wheat based snack. *Foods*, 5(2), 1–8. <https://doi.org/10.3390/foods5020026>
- Paulina, A., De La Rosa, B., Ángel Huerta-Ocampo, J., Jiménez-Islas, H., & Barrera-Pacheco, A. (2017).** Effect of amaranth consumption on diabetes-related biomarkers in patients with diabetes. *researchgate.net*. [https://www.researchgate.net/profile/Jose-Huerta-Ocampo/publication/317549175\\_Effect\\_of\\_amaranth\\_consumption\\_on\\_diabetes-related\\_biomarkers\\_in\\_patients\\_with\\_diabetes/links/5940037745851554614952f1/Effect-of-amaranth-consumption-on-diabetes-related-biomarkers-in-patients-with-diabetes.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jose-Huerta-Ocampo/publication/317549175_Effect_of_amaranth_consumption_on_diabetes-related_biomarkers_in_patients_with_diabetes/links/5940037745851554614952f1/Effect-of-amaranth-consumption-on-diabetes-related-biomarkers-in-patients-with-diabetes.pdf)
- Peregrina, L., Sociológicas, J. L.-R. C., & 2018, undefined. (2018).** La producción de maíz en México. ¿ seguridad o dependencia alimentaria? = The production of corn in Mexico. Food security or dependence? *revistas.ues.edu.sv*. <http://revistas.ues.edu.sv/index.php/conjsociologicas/article/view/1459>
- Peter, K., & Gandhi, P. (2017).** Rediscovering the therapeutic potential of *Amaranthus* species : A review . *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(3), 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2017.05.001>
- Phillips, C. M., Chen, L.-W., Heude, B., Bernard, J. Y., Harvey, N. C., Duijts, L., Mensink-Bout, S. M., Polanska, K., Mancano, G., Suderman, M., Shivappa, N., & Hébert, J. R. (2019).** Dietary inflammatory index and non-communicable disease risk: a narrative review. *mdpi.com*, 11, 1873. <https://doi.org/10.3390/nu11081873>
- Ramírez-Torres, G., Ontiveros, N., Lopez-Teros, V., Ibarra-Diarte, J. A., Reyes-Moreno, C., Cuevas-Rodríguez, E. O., & Cabrera-Chávez, F.**

(2017). Amaranth protein hydrolysates efficiently reduce systolic blood pressure in spontaneously hypertensive rats. *mdpi.com*. <https://doi.org/10.3390/molecules22111905>

**Rashid, S., Rakha, A., Anjum, F. M., Ahmed, W., & Sohail, M. (2015).** Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and Water Solubility Index of wheat bran extrudates. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(7), 1533–1537. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12798>

**Rojas-Martínez, R., Basto-Abreu, A., Aguilar-Salinas, C. A., Zárate-Rojas, E., Villalpando, S., & Barrientos-Gutiérrez, T. (2018).** Prevalencia de diabetes por diagnóstico médico previo en México. *scielo.org.mx*, 60(3), 224–232. <https://doi.org/10.21149/8566>

**Rouf Shah, T., Prasad, K., & Kumar, P. (2016).** Maize—A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent Food and Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1166995>

**Sánchez-Madrugal, M. Á., Quintero-Ramos, A., Martínez-Bustos, F., Meléndez-Pizarro, C. O., Ruiz-Gutiérrez, M. G., Camacho-Dávila, A., Torres-Chávez, P. I., & Ramírez-Wong, B. (2015).** Effect of different calcium sources on the bioactive compounds stability of extruded and nixtamalized blue maize flours. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2701–2710. <https://doi.org/10.1007/S13197-014-1307-9>

**Sandoval-Sicairos, E. S., Domínguez-Rodríguez, M., Montoya-Rodríguez, A., Milán-Noris, A. K., Reyes-Moreno, C., & Milán-Carrillo, J. (2020).** Phytochemical Compounds and Antioxidant Activity Modified by Germination and Hydrolysis in Mexican Amaranth. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(2), 192–199. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00798-z>

**Satterlee, L., Kendrick, J., ... H. M.-J. of the, & 1982, undefined. (1982).** In vitro assay for predicting protein efficiency ratio as measured by rat

bioassay: collaborative study. *academic.oup.com*.  
<https://academic.oup.com/jaoac/article-abstract/65/4/798/5702904>

**Sharma, P., Gujral, H. S., & Singh, B. (2012).** Antioxidant activity of barley as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry*, 131(4), 1406–1413.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.009>

**Singh, S., Gamlath, S., & Wakeling, L. (2007).** Nutritional aspects of food extrusion: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 42(8), 916–929. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2006.01309.X>

**Singleton, V., Orthofer, R., enzymology, R. L.-R.-M. in, & 1999, undefined. (1999).** Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Elsevier*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0076687999990171>

**Smorowska, A., ... A. Ż.-J. of F., & 2021, undefined. (2021).** Nutritional Properties and In Vitro Antidiabetic Activities of Blue and Yellow Corn Extracts: A Comparative Study. *hindawi.com*.  
<https://www.hindawi.com/journals/jfq/2021/8813613/>

**Srivastava, R. K. (2018).** Need of Nutraceuticals / Functional Food Products for Health Benefits to World-Wide People. *Journal of Biotechnology and Biomedical Science*, 1(4), 1–13. <https://doi.org/10.14302/ISSN.2576-6694.JBBS-18-2408>

**Tinus, T., Damour, M., Van Riel, V., & Sopade, P. A. (2012).** Particle size–starch–protein digestibility relationships in cowpea (*Vigna unguiculata*). *Journal of Food Engineering*, 113(2), 254–264.  
<https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2012.05.041>

**Tudorică, C. M., Kuri, V., & Brennan, C. S. (2002).** Nutritional and physicochemical characteristics of dietary fiber enriched pasta. *Journal of*

*Agricultural and Food Chemistry*, 50(2), 347–356.  
<https://doi.org/10.1021/JF0106953>

**UNICEF, undefined. (2018).** *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo: fomentando la resiliencia climática en aras de la seguridad alimentaria y la nutrición.*  
<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/27978>

**Uriarte-Aceves, P. M., Cuevas-Rodríguez, E. O., Gutiérrez-Dorado, R., Mora-Rochín, S., Reyes-Moreno, C., Puangpraphant, S., & Milan-Carrillo, J. (2015).** Physical, Compositional, and Wet-Milling Characteristics of Mexican Blue Maize (*Zea mays* L.) Landrace. *Cereal Chemistry*, 92(5), 491–496. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-15-0001-R>

**Urias-Lugo, D. A., Heredia, J. B., Serna-Saldivar, S. O., Muy-Rangel, M. D., & Valdez-Torres, J. B. (2015).** Total phenolics, total anthocyanins and antioxidant capacity of native and elite blue maize hybrids (*Zea mays* L.). *CYTA - Journal of Food*, 13(3), 336–339.  
<https://doi.org/10.1080/19476337.2014.980324>

**Celeste Gámez-Valdez, L., Gutiérrez-Dorado, R., Alberto Gómez-Aldapa, C., Xiomara Korina Perales-Sánchez, J., Milán-Carrillo, J., Oliva Cuevas-Rodríguez, E., Mora-Rochín, S., & Reyes-Moreno, C. (2020).** Effect of the extruded amaranth flour addition on the nutritional, nutraceutical and sensory quality of tortillas produced from extruded creole blue maize flour Efecto de la adición de harina de amaranto extruido sobre la calidad nutricional, nutracéutica y sensorial de tortillas producidas a partir de harina de maíz azul criollo extrudido. <http://biotecnia.unison.mx>

**Yao, Y., Products, G. R.-I. C. and, & 2014, undefined. (2014).** Suppressive effect of extruded adzuki beans (*Vigna angularis*) on hyperglycemia after

sucrose loading in rats. *Elsevier*.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669013005815>

**Yust, M. M., Pedroche, J., Girón-Calle, J., Vioque, J., Millán, F., & Alaiz, M. (2004).** Determination of tryptophan by high-performance liquid chromatography of alkaline hydrolysates with spectrophotometric detection. *Food Chemistry*, *85*(2), 317–320.

**Zhang, Q., Gonzalez de Mejia, E., Luna-Vital, D., Tao, T., Chandrasekaran, S., Chatham, L., Juvik, J., Singh, V., & Kumar, D. (2019).** Relationship of phenolic composition of selected purple maize (*Zea mays* L.) genotypes with their anti-inflammatory, anti-adipogenic and anti-diabetic potential. *Food Chemistry*, *289*, 739–750.  
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.03.116>

## ANEXOS

**Anexo 1.** Certificado de participación en congreso internacional virtual FIRST: Food Improved by Research, Science & Technology del Institute of Food Technologists, en modalidad póster titulado “Nutritional, Techno-Functional and Nutraceutical Characterization of an Amaranth/Blue Maize Food Pasta”.





La Academia Mexicana de Investigación y Docencia  
en Ingeniería Química (AMIDIQ)

otorga el presente

## RECONOCIMIENTO

a:

Eduardo Alberto Vargas Zamudio, Alvaro Montoya Rodríguez, Evelia María Milán Noris, Ada Keila Milán Noris, Eslim Sugay Sandoval Sicairos, Jorge Milán Carrillo

**Por la presentación del trabajo en modalidad cartel:**

**CARACTERIZACIÓN NUTRICIONAL, TECNOFUNCIONAL Y NUTRACEUTICA DE UNA  
PASTA ALIMENTICIA DE AMARANTO/MAÍZ AZUL**

  
Dra. María del Rosario Enriquez Rosado  
PRESIDENTA DEL AMIDIQ Y DEL COMITÉ ORGANIZADOR

  
Dr. Tomás Arreola García  
PRESIDENTE DEL COMITÉ TÉCNICO

ID: 241

Evento virtual del 08 al 11 de septiembre de 2021

**Anexo 2.** Certificado de participación en el congreso “XLII Encuentro Nacional: Desafíos actuales en la investigación y docencia en ingeniería química” de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ) por la presentación en modalidad cartel del trabajo titulado: “Caracterización Nutricional, Tecnofuncional y Nutraceutica de una Pasta de Amaranto/Maíz Azul”.